

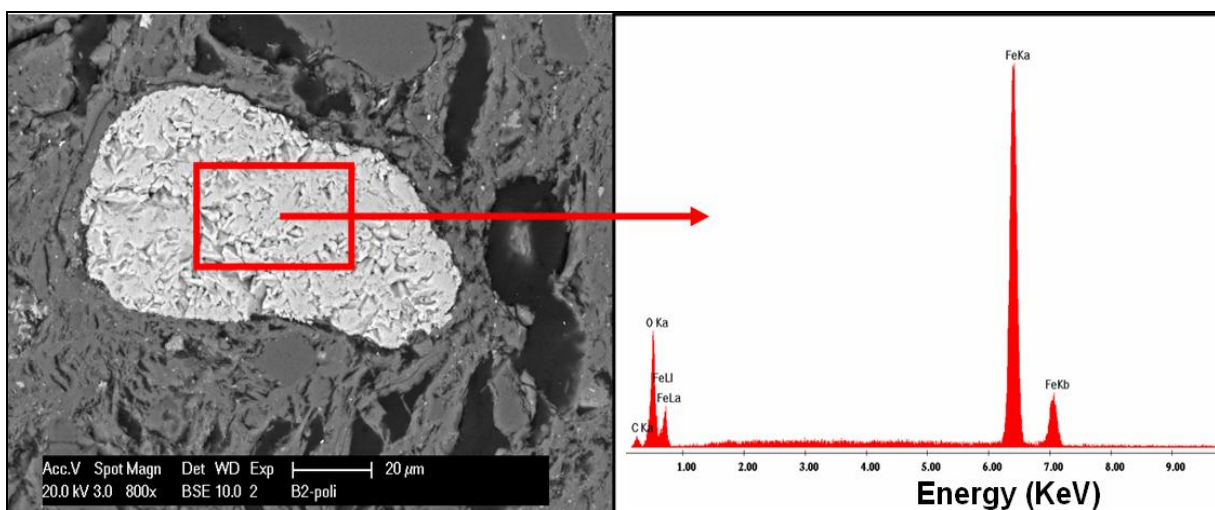
THESE :

Caractérisation et valorisation des matériaux argileux de la Province de Kinshasa (RD Congo)

Présentée par Dominique WETSHONDO OSOMBA
(Diplômé d'études approfondies en sciences appliquées)

Pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences de l'Ingénieur
(Architecture, Génie civil et Géologie)

Promoteur : Prof. Eric PIRARD



Juin 2012

DEDICACE

A ma mère DEMBO ANUNGA pour tant d'affection et de souffrances endurées. Je sais que tu aurais bien voulu voir encore ton mari vivant afin de célébrer ensemble ce particulier évènement. Mais hélas, le destin en a décidé autrement. Papa, je t'aime infiniment et que ton âme repose en paix.

A mon épouse Suzane LOKANYI pour ton amour de tout cœur, ton soutien moral et spirituel. Bien que souffrante, en différents moments, de mon absence au foyer, tu as su assumer efficacement les responsabilités familiales.

A mes fils : Plamédi OSOMBA, José OTHEPA et Dominique-Junior WETSHONDO pour avoir été privés de mon affection pendant de longues périodes. Je vous aime tous et que ce travail vous serve d'excellent exemple de persévérance à suivre.

A mon oncle, Comptable DJAMBA Joseph que je ne reverrai plus. Tes bienveillances, surtout tes précieux conseils sont gravés dans ma mémoire et ont beaucoup contribué à vaincre certains de mes obstacles de la vie humaine.

A mes sœurs et frères pour tout l'amour familial inconditionnel.

A tous ceux qui aiment le prochain, ma famille et la science.

Je dédie cette thèse de doctorat.

Dominique WETSHONDO OSOMBA

REMERCIEMENTS

Un travail scientifique et plus particulièrement une thèse de doctorat constitue un véritable « édifice cristallin » mis en œuvre par son auteur mais dont l'apport externe est toujours nécessaire pour sa bonne réussite. C'est pourquoi, en ce moment où je termine, après quatre ans, mes recherches doctorales en sciences appliquées en vue de l'obtention de mon dernier titre académique, je voudrais penser à toute personne qui m'a été utile à la réalisation de cet important travail.

Je remercie chaleureusement Monsieur le Professeur Eric PIRARD, promoteur de ce travail, qui a mis à ma disposition toutes ses compétences, son expérience et ses services pour son aboutissement. Son implication à différents niveaux pour un bon déroulement de mes séjours en Belgique a été très efficace. Mes vifs et sincères remerciements s'adressent également aux membres du comité d'accompagnement : Professeurs Luc COURARD et Angélique LEONARD qui ont travaillé de commun en accord pour mon encadrement.

Je remercie aussi Monsieur le Professeur Charles MPIANA, promoteur local, auprès de qui j'ai bénéficié d'un encadrement académique indispensable depuis que j'ai été recruté comme assistant puis promu au grade de Chef de Travaux à l'Université de Kinshasa. Malgré son âge, il a accepté de couler ses sueurs sur un soleil accablant pour me faire profiter de son expérience de terrain pendant les travaux d'échantillonnage de mes matériaux d'étude et les observations géo-environnementales sur les sites d'exploitation concernés. Ses conseils et ses encouragements pour mon épanouissement scientifique et professionnel ont porté leurs fruits et sont donc inoubliables.

Ma profonde reconnaissance s'adresse à l'Agence Belge de Développement (C.T.B) pour avoir accepté de financer les différentes composantes budgétaires relatives à cette recherche doctorale.

J'exprime ma reconnaissance aux diverses autorités académiques de l'Université de Kinshasa ainsi qu'aux professeurs de la Faculté des Sciences. Je pense particulièrement aux professeurs Valentin KANDA et Albert ONGENDANGENDA qui m'ont beaucoup soutenu pendant les moments difficiles de mes recherches locales à Kinshasa.

Mes sincères remerciements s'adressent également aux principaux responsables de laboratoires qui m'ont accueilli et accepté de procéder aux différentes analyses de mes échantillons d'étude :

- Monsieur Daniel DECONINCK du complexe industriel de CERATEC ;
- Madame N. FAGEL et Monsieur F. HATERT du Département de Géologie de l'ULg ;
- Monsieur Philippe COMPERE de la Cellule d'Appui Technologique en Microscopie de l'ULg.

Que mon collègue Géologue Karrol KADIATA trouve ici l'expression de ma reconnaissance pour m'avoir accompagné sur les différents sites d'échantillonnage. Sa contribution aux observations géologiques de terrain n'a pas été de moindre envergure.

J'adresse enfin ma gratitude à tous les membres de ma famille résidants en Europe pour leur soutien moral, social ou financier pendant toute la durée de ma recherche doctorale.

RESUME

A la suite de la promulgation du Code Minier en juillet 2002, la quasi-totalité des investissements des sociétés minières nationales ou multinationales œuvrant en RD Congo est orientée vers les métaux de base (Cu, Co, Sn, Mn,...) et les substances minérales précieuses (or, diamant, ...). La filière de la céramique pourtant très prometteuse et qui utilise, comme matières premières, les substances minérales industrielles compte parmi les secteurs les moins développés et/ou inexistant dans la majeure partie du pays.

Dans une perspective de développement local durable, la présente étude a l'avantage de contribuer à la promotion des matériaux locaux de construction tout en améliorant la qualité des briques artisanales produites et à inciter la création des PME dans la filière de la céramique en RD Congo. Elle constitue donc un apport scientifique important dans la connaissance et la caractérisation des substances minérales industrielles de la RD Congo et plus particulièrement les matériaux argileux de Kinshasa et environs.

Les connaissances scientifiques acquises sur les matériaux naturels et sur les produits fabriqués permettent de justifier l'emploi des matériaux du site pilote de Kasangulu dans la filière grossière de la céramique ou céramique de construction ; ceux du deuxième site pilote, Kingabwa, dans le secteur des réfractaires silico-alumineux et dans la branche de la céramique fine, traditionnelle et industrielle.

En effet, les matériaux de Kasangulu et plus particulièrement les lithofaciès des couches 2 et 3 sont des produits silico-argileux plastiques qui constituent des ressources minérales industrielles de bonne qualité pour la fabrication des produits variés dont les briques stabilisées ou cuites (creuses, perforées, pleines et de parement), les hourdis et les tuiles.

La présence de la goethite associée à l'oxyde de titane dans ces produits naturels apporte une plus-value considérable dans la teinture rougeâtre et/ou jaunâtre des produits finis.

Les argiles de Kingabwa, que nous qualifions « d'argiles nobles », sont utilisables dans la fabrication des produits à plus haute valeur ajoutée comme les porcelaines. Néanmoins, les produits cuits de Kingabwa ont présenté un retrait à la cuisson de 9 à 12% pour des températures allant de 1100 à 1150°C et une perte en poids à la cuisson de l'ordre de 14% en moyenne. Pour une bonne rentabilité industrielle, ces retraits peuvent être minimisés par l'ajout d'une quantité optimale de dégraissant ou en revoyant à la hausse la température du séchage pendant l'élaboration des produits.

Il a été montré que l'évolution de la résistance mécanique à la compression dans les briquettes cuites n'est pas totalement fonction de la porosité ou des retraits à la cuisson ni de la simple quantité de mullite formée. La fissuration de la pâte et le développement des fissures linéaires, surtout celles en cercles concentriques autour des cristaux influencent beaucoup cette propriété.

Les ressources minérales étudiées présentent un avantage environnemental de taille pour leur emploi comme matières premières dans l'industrie céramique. En effet, ces substances sont très pauvres en matières organiques et ne contiennent pas des éléments tels que le soufre, la pyrite ou les carbonates.

Mots clés : Caractérisation ; Valorisation ; Substances minérales industrielles ; Kaolinite ; Mullite ; Fissures ; Industrie céramique ; RD Congo ; Kinshasa.

ABSTRACT

Following the promulgation of the Mining Code in July 2002, almost all investments of the national or multinational mining companies working in DR Congo is directed to basic metals (Cu, Co, Sn, Mn) and precious minerals (gold, diamond). The sector of ceramic which is very promising and using industrial substances as raw materials is among the lowest developed sectors in the most of the country.

In a prospect of sustainable local development, this study aims to promote local building materials and improve the quality of the traditional bricks, to promote the creation of Small and Medium sized Enterprises (SMEs) in the ceramic sector (DR Congo). The study constitutes an important scientific contribution in the knowledge and characterization of industrial mineral substances of the DR Congo, more particularly the Kinshasa's clayey materials.

The scientific knowledge on natural materials and industrial made products allow to justify the use of materials from the Kasangulu site in the ceramic sector (building materials); materials from the Kingabwa site in the sector of alumino-silicate refractors and in the fine industrial and traditional ceramic sector. However, Kasangulu materials and particularly the lithofacies of layers 2 and 3 are clay silicates plastic products which are the industrial mineral resources of good quality in processing of various products, such as stables bricks (cooked bricks), slab and tiles. The presence of goethite associated with titanium oxide in these natural products gives a more considerable value in reddish and/or yellowish color of finite products.

The clays from Kingabwa, qualified as «noble clay», are used in processing of products with high added value like porcelains. Nevertheless, the cooked products of Kingabwa presented a cooking withdrawal of 9 to 12 % for the temperature ranging from 1100 to 1150 °C and a cooking loss weigh of about 14 %. For a good industrial benefit, these withdrawals may be minimized by adding an optimal quantity of skimmer or by increasing the drying temperature during the elaboration of the products.

It was shown that the evolution of the mechanic resistance to compression in cooked bricks is not totally a function of the porosity or the cooking withdrawals and the simple quantity of formed mullite. The cracking of mud and the development of the linear cracks, especially those in concentric circles around crystals greatly influence this property.

The studied mineral resources present an environmental advantage concerning their use as raw materials in ceramic industry. However, these substances are very poor in organic matter content and do not contain chemical substances such as sulfur, pyrite or carbonates.

Keys words: Characterization; valorization; industrial mineral substances; kaolinite; mullite; cracks; ceramic industry; RD Congo; Kinshasa.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	0
REMERCIEMENTS	2
RESUME.....	3
ABSTRACT	4
TABLE DES MATIERES	5
LISTE DES FIGURES	11
LISTE DES TABLEAUX.....	14
INTRODUCTION GENERALE.....	16
1. Contexte.....	16
2. Objectifs et intérêt scientifique du sujet	18
3. Matériels et méthodes.....	19
3.1. Matériels.....	19
3.2. Méthodes	20
4. Subdivision du travail.....	22
CHAPITRE I : CONTEXTES GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE	23
DE LA ZONE D’ETUDE	23
I.1. Introduction.....	23
I.2. Cadre géographique	23
I.2.1. Province de Kinshasa	23
I.2.1.1. Localisation et statut administratif	23
I.2.1.2. Population et Habitat.....	25
I.2.1.3. Topographie	29
I.2.1.4. Climat.....	30
I.2.1.5. Hydrographie	31
I.2.1.6. Végétation	31
I.2.1.7. Sols.....	31
I.2.2. Territoire de Kasangulu	32
I.3. Cadre géologique	33
I.3.1. Lithostratigraphie et faciès géologiques	34
I.3.1.1. Terrains de couverture	34
I.3.1.2. Terrains du soubassement	35
I.3.1.3. Faciès géologiques	36
I.3.2. Données de forages d’eau et commentaires des coupes géologiques	37
I.4. Conclusions partielles	40
CHAPITRE II : LES SUBSTANCES MINERALES INDUSTRIELLES	42
II.1. Introduction.....	42
II.2. Classification des substances minérales industrielles.....	42
II.3. Les minéraux argileux	44
II.3.1. Structure cristalline.....	44
II.3.2. Classification	46
II.3.2.1. Les minéraux 1/1	46
II.3.2.2. Les minéraux 2/1	48
II.3.2.3. Les minéraux 2/1/1 et les minéraux fibreux	50
II.3.2.4. Les minéraux interstratifiés	52
II.3.3. Secteurs d’utilisation et valeur commerciale des argiles.....	52
II.4. Les produits céramiques	58
II.4.1. Matières premières : Extraction et exigences technologiques	58
II.4.1.1. Matières premières.....	58

II.4.1.2.Extraction des matières premières argileuses	62
II.4.1.3. Exigences technologiques.....	63
II.4.1.3.1. Granulométrie	63
II.4.1.3.2. Composition chimique et minéralogique.....	65
II.4.1.3.3. Plasticité	70
II.4.1.3.3.1. Limites de liquidité (W_L) et de plasticité (W_P).....	70
II.4.1.3.3.2. Limite de retrait (W_S)	70
II.4.1.3.3.3. Indices de plasticité (I_P) et de consistance (I_C)	71
II.4.1.3.3.4. Degré de cristallinité.....	73
II.4.2. Procédés de fabrication.....	77
II.4.2.1. Préparation	77
II.4.2.1.1. Pré-séchage et pré-mélange	77
II.4.2.1.2. Concassage et broyage primaires.....	78
II.4.2.1.3. Broyage.....	78
II.4.2.1.4. Criblage et classification.....	78
II.4.2.1.5. Mélange des composants	79
II.4.2.1.6. Autres.....	79
II.4.2.2. Façonnage	79
II.4.2.2.1. Pressage	80
II.4.2.2.2. Extrusion.....	81
II.4.2.2.3. Moulage	81
II.4.2.2.4. Coulage en barbotine	82
II.4.2.3. Séchage	82
II.4.2.3.1. Séchage naturel	83
II.4.2.3.2. Séchage artificiel	83
(1) Séchoirs à chambres (intermittents).....	83
(2) Séchoirs verticaux.....	84
(3) Séchoirs tunnel (continu).....	84
(4) Séchoirs à rouleaux (à étages horizontaux)	84
(5) Séchoirs à plancher chauffant	84
II.4.2.4. Traitements de surface et décoration des produits	85
II.4.2.4.1. Texturation et revêtements	85
II.4.2.4.2. Emaillage et engobage	85
II.4.2.5. Cuisson	86
II.4.2.5.1. Objectifs.....	86
II.4.2.5.2. Installations pour la cuisson.....	87
II.4.2.5.2.1. Fours intermittents	87
II.4.2.5.2.2. Fours continus.....	88
(1) Fours tunnels.....	88
(2) Fours Hoffmann (Fours à chambres)	88
(3) Fours à rouleaux	88
(4) Fours à dalles glissantes.....	89
(5) Fours rotatifs	89
(6) Cuisson en meule.....	89
II.4.2.5.3. Transformations chimiques et minéralogiques.....	90
II.4.2.5.3.1. Elimination de l'eau et oxydation.....	90
II.4.2.5.3.2. Mullitisation.....	90
II.4.2.5.3.3. Transformations allotropiques du quartz	93
II.4.2.5.3.4. Les phases vitreuses.....	95
II.4.2.5.3.5. Autres transformations.....	96

II.4.2.6. Opérations post-cuisson	97
II.5. Conclusions partielles	97
CHAPITRE III: TRAVAUX DE TERRAIN	99
III.1. Introduction	99
III.2. Matériels utilisés sur terrain	99
III.3. Sites d'exploitation des matériaux argileux	100
III.3.1. Site de Kingabwa.....	103
III.3.1.1. Présentation et observations géo-environnementales.....	103
III.3.1.2. Description des puits d'échantillonnage.....	104
III.3.1.3. Exploitation et usages des argiles de Kingabwa	113
III.3.2. Sites de Lemba Imbu et de Ndjili Cecomaf	115
III.3.2.1. Présentation et observations géo-environnementales.....	115
III.3.2.2. Description des puits d'échantillonnage.....	116
III.3.3. Site de Kasangulu.....	120
III.3.3.1. Présentation et observations géo-environnementales.....	120
III.3.3.2. Description des puits d'échantillonnage.....	125
III.3.4. Sites de Brikin et de Lutendele.....	132
III.3.4.1. Présentation et observations géo-environnementales.....	132
III.3.4.2. Description des points d'échantillonnage.....	134
III.4. Conclusions partielles.....	134
CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET VALORISATION DES MATERIAUX NATURELS	136
IV.1. Introduction	136
IV.2. Essais d'identification géotechniques	137
IV.2.1. Teneur en eau naturelle	137
IV.2.1.1. Principe	137
IV.2.1.2. Résultats	137
IV.2.2. Teneur en matières organiques.....	138
IV.2.2.1. Principe	138
IV.2.2.2. Résultats et discussions	138
IV.2.3. Equivalent de sable	139
IV.2.3.1. But de l'essai	139
IV.2.3.2. Principe	140
IV.2.3.2.1. Matériels et réactifs	140
IV.2.3.2.2. Mode opératoire et calcul.....	140
IV.2.3.3. Résultats	141
IV.2.4. Etude granulométrique	141
IV.2.4.1. Techniques d'analyse utilisées.....	141
IV.2.4.2. Tamisage et sédimentométrie	142
IV.2.4.2.1. Matériels et produits.....	142
IV.2.4.2.2. Mode opératoire	143
IV.2.4.2.3. Calculs et encodage des données	145
(1) Poids volumique réel	145
(2) Teneur en eau.....	145
(4) Pourcentage d'éléments inférieurs à D	146
IV.2.4.2.4. Résultats et commentaires.....	147
IV.2.4.3. Granulométrie par diffraction laser	155
IV.2.4.3.1. Principe	155
IV.2.4.3.1.1. Modèle de Fraunhofer	156
IV.2.4.3.1.2. Modèle de Mie	156

IV.2.4.3.1.3. Théorie de la sphère équivalente.....	156
IV.2.4.3.2. Protocole expérimental.....	157
IV.2.4.3.3. Résultats de l'analyse par granulométrie laser.....	159
IV.2.4.4. Granulométrie par analyse d'images.....	165
IV.2.4.4.1. Principe et matériel d'acquisition d'images.....	165
IV.2.4.4.2. Résultats et discussions.....	166
IV.2.4.4.2.1. Analyse de la distribution.....	166
IV.2.4.4.2.2. Analyse de la taille et de la forme des particules.....	170
IV.2.4.5. Discussions et comparaison des résultats de différentes méthodes.....	175
IV.2.4.6. Intérêt technologique de la granulométrie.....	182
IV.2.5. Limites d'Atterberg.....	186
IV.2.5.1. Principe de détermination.....	186
IV.2.5.2. Résultats et discussions.....	188
IV.2.6. Proctor Normal Modifié.....	191
IV.2.6.1. But et signification de l'essai.....	191
IV.2.6.2. Principe de la méthode.....	192
IV.2.6.3. Matériels.....	192
IV.2.6.4. Résultats.....	193
IV.3. Analyses chimiques.....	194
IV.3.1. Spectroscopie d'absorption atomique.....	194
IV.3.1.1. Matériel et méthode.....	194
IV.3.1.2. Résultats et discussions.....	194
IV.3.2. Fluorescence X.....	195
IV.3.2.1. Procédé analytique et préparation des échantillons.....	195
IV.3.2.2. Résultats et discussions.....	196
IV.4. Analyses minéralogiques.....	201
IV.4.1. Diffraction des rayons X.....	201
IV.4.1.1. Principe de la méthode.....	201
IV.4.1.2. Matériel.....	202
IV.4.1.3. Préparation des échantillons.....	203
IV.4.1.4. Traitements spéciaux de préparations.....	204
IV.4.1.5. Dépouillement des diffractogrammes.....	205
IV.4.1.6. Présentation et interprétation des résultats.....	209
IV.4.2. Spectroscopie infrarouge.....	219
IV.4.2.1. Matériel et méthode.....	219
IV.4.2.2. Dépouillement des spectres infrarouges.....	219
IV.4.2.2.3. Résultats et interprétation.....	223
IV.5. Conclusions partielles.....	227
IV.5.1. Matériaux naturels du site pilote de Kasangulu.....	227
IV.5.2. Matériaux naturels du site pilote de Kingabwa.....	228
CHAPITRE V : FABRICATION ET CARACTERISATION DES BRIQUETTES	
EXPERIMENTALES.....	230
V.1. Introduction.....	230
V.2. Fabrication.....	230
V.2.1. Briquettes cuites.....	230
V.2.1.1. Préparation.....	231
V.2.1.2. Façonnage.....	233
V.2.1.3. Séchage.....	234
V.2.1.4. Cuisson.....	235

V.2.2. Briquettes stabilisées	235
V.3. Caractéristiques technologiques	236
V.3.1. Produits de cuisson	236
V.3.1.1. Coloration	236
V.3.1.2. Teneur en eau à l'étirage	236
V.3.1.3. Retrait au séchage	239
V.3.1.4. Retrait à la cuisson	243
V.3.1.5. Perte en poids à la cuisson	246
V.3.1.6. Absorption d'eau et paramètres associés	250
V.3.1.6.1. But de l'essai	250
V.3.1.6.2. Détermination	250
V.3.1.6.3. Résultats et discussions	251
V.3.1.7. Résistance mécanique	257
V.3.1.7.1. Matériel de détermination	257
V.3.1.7.2. Résultats et discussions	258
V.3.2. Produits stabilisés	263
V.4. Caractéristiques minéralogiques et granulométriques	264
V.4.1. Techniques	264
V.4.1.1. Diffraction des rayons X	264
V.4.1.2. Microscopie Electronique à Balayage (MEB)	264
V.4.1.3. Granulométrie	265
V.4.2. Résultats et discussions	265
V.5. Conclusions partielles	288
CHAPITRE VI : INTERET POUR UN DEVELOPPEMENT LOCAL DURABLE	289
VI.1. Introduction	289
VI.2. Valorisation des ressources naturelles	289
VI.3. Marché de matériaux de construction et de produits céramiques	290
VI.4. Respect des aspects esthétiques, thermiques, climatiques et autres	293
VI.4.1. Tradition	293
VI.4.2. Esthétique	294
VI.4.3. Résistance à la compression et à l'érosion	294
VI.4.4. Ecologie et recherches technologiques innovantes	295
VI.4.4.1. Géo(Bio)polymérisation	296
VI.4.4.2. Biominéralisation	297
VI.4.4.3. Brûleurs à tube radiant	298
VI.4.4.4. Cuisson assistée par micro-ondes et séchoirs à micro-ondes	298
VI.4.4.5. Nouveau type de système de séchage pour les produits réfractaires	299
VI.4.5. Isolations thermique et acoustique	300
VI.5. Encadrement des exploitants et incitation à la création des PME	300
VI.5.1. Filières céramiques envisageables	300
VI.5.2. Incidences environnementales potentielles	306
VI.5.2.1. Air	307
VI.5.2.2. Atmosphère	309
VI.5.2.3. Eau	309
VI.5.2.4. Sol et sous-sol	310
VI.5.2.5. Biotopes	310
VI.5.2.6. Déchets	310
VI.5.2.7. Santé et sécurité	311
VI.6. Conclusions partielles	312
CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES	315

1. Connaissances scientifiques acquises.....	315
2. Secteurs de valorisation.....	316
3. Perspectives.....	317
3.1. Confection et caractérisation des briques réfractaires.....	317
3.2. Valorisation de déchets énergétiques et analyse du cycle de vie.....	318
3.3. Cartographie informatisée des substances minérales industrielles.....	319
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	320
ANNEXES.....	337

LISTE DES FIGURES

Fig. 1: Schéma de la méthodologie utilisée.....	21
Fig. 2: Présentation de la province de Kinshasa (OCHA, 2011).....	24
Fig. 3: Les districts administratifs de la province de Kinshasa	26
Fig. 4: Vue partielle de la commune de la Gombe à Kinshasa	28
Fig. 5: Localisation du Territoire de Kasangulu au Bas-Congo (OCHA, 2011)	32
Fig. 6: Extrait de la carte géologique du degré carré S5/15 (SERVICE GEOL., RD CONGO, 1964).....	33
Fig. 7: Position stratigraphique et localisation du Groupe d'Inkisi (TACK L. et al., 2001)	35
Fig. 8: Les faciès géologiques de la province de Kinshasa (EGOROFF S., 1955).	36
Fig. 9: Carte de localisation des forages à Kinshasa	38
Fig. 10: Coupe géologique Nord-Sud.....	38
Fig. 11: Coupe géologique Ouest-Est	39
Fig. 12: Les plans anioniques X (a), Y (b) et Z(c) des minéraux argileux (PIALY P, 2009)	45
Fig. 13: Structure des minéraux 1/1 (exemple de la kaolinite) (BERGAYA F. et al., 2006)	47
Fig. 14: Structure idéale des minéraux 2/1(BERGAYA F. et al., 2006 ; PIALY P., 2009).....	49
Fig. 15: Les minéraux fibreux : (a) Palygorskite; (b) Sépiolite (CAILLERE S. et al., 1982)	52
Fig. 16: Secteurs d'application du kaolin.....	55
Fig. 17: Spectres infrarouges de kaolinites synthétiques d'ordre structural variable	76
Fig. 18: Transformations allotropiques du quartz.....	94
Fig. 19: Localisation des sites d'échantillonnage des matériaux argileux.....	102
Fig. 20: Quelques anciens puits d'exploitation artisanale d'argile remplis d'eau	104
Fig. 21: Vue de quelques points d'échantillonnage à Kingabwa.....	105
Fig. 22: Coupe du puits Ndjili-006 à Kingabwa.....	106
Fig. 23: Coupe du puits Ndjili-007 à Kingabwa.....	107
Fig. 24: Coupe du puits Ndjili-008 à Kingabwa.....	108
Fig. 25: Coupe des puits IDI AMIN-10 et 11 à Kingabwa.....	109
Fig. 26: Coupe du puits Salongo-003 à Kingabwa	110
Fig. 27: Coupe du puits Salongo-004 à Kingabwa	111
Fig. 28: Coupe du puits Salongo-005 à Kingabwa	112
Fig. 29: Coupe du puits MBE à Kingabwa	113
Fig. 30: Exploitation et commercialisation artisanales des argiles de Kingabwa.....	114
Fig. 31: Une maisonnette de Lemba Imbu à base des matériaux d'un puits environnant	115
Fig. 32: Puits d'exploitation artisanale d'argile à Ndjili Cecomaf.....	116
Fig. 33: Coupe des puits Mavuba et Kimwenza à Lemba Imbu.....	117
Fig. 34: Coupe des puits Coco-1 et Coco-2 à Ndjili Cecomaf.....	118
Fig. 35: Coupe du puits de la vallée maraîchère à Lemba Imbu	119
Fig. 36: Une vue de la carrière d'exploitation de grès de SGI à Kasangulu.....	121
Fig. 37: Paysage et quelques maisons de la cité de Kasangulu	122
Fig. 38: Vue partielle d'une briqueterie artisanale de Nsaya à Kasangulu	123
Fig. 39: Abattage d'arbres au bord de la rivière Lukaya à Kasangulu	124
Fig. 40: Fronts de taille de puits d'exploitation artisanale de Nsaya à Kasangulu	125
Fig. 41: Coupe du puits Nsaya-1 à Kasangulu.....	126
Fig. 42: Coupe du puits Nsaya-2 à Kasangulu.....	127
Fig. 43: Coupe du puits Suisse à Kasangulu.....	128
Fig. 44: Coupe du puits NIFE à Kasangulu	129
Fig. 45: Coupe du puits Salongo à Kasangulu	130

Fig. 46: Coupe de la carrière SGI à Kasangulu	131
Fig. 47: Une vue désolante de l'usine de Brikin attestant sa vétusté	133
Fig. 48: Echantillonnage dans les anciennes carrières de l'Ex-Brikin à Lutendele	134
Fig. 49: Courbes granulométriques classiques des matériaux naturels de Kasangulu	153
Fig. 50: Courbes granulométriques classiques des matériaux naturels de Kingabwa	154
Fig. 51: Phénomènes physiques impliqués dans la théorie de Mie	155
Fig. 52: Granulomètre laser Malvern Mastersizer 2000	158
Fig. 53: Courbes granulométriques non cumulatives (Dolapix ; Modèle de Mie)	160
Fig. 54: Courbes granulométriques cumulatives (Dolapix ; Modèle de Mie)	161
Fig. 55: Courbes granulométriques cumulatives des matériaux de Kingabwa	163
Fig. 56: Courbes granulométriques cumulatives des matériaux de Kasangulu	164
Fig. 57: Schéma du principe et matériel d'acquisition d'images	166
Fig. 58: Courbes cumulatives des particules des matériaux étudiés	167
Fig. 59: Distribution granulométrique des particules des matériaux de Kasangulu	168
Fig. 60: Distribution granulométrique des particules des matériaux de Kingabwa	169
Fig. 61: Définition de paramètres de tailles de quelques particules (OCCHIO, 2011)	170
Fig. 62: Paramètres de la taille et de la forme des particules de matériaux naturels	172
Fig. 63: 2D Box plot (élongation-diamètre interne) des matériaux de Kasangulu.....	173
Fig. 64: 2D Box plot (élongation-diamètre interne) des matériaux de Kingabwa	174
Fig. 65: Différences observées entre les résultats de la sédimentométrie et diffraction laser.....	177
Fig. 66: Microphotographies de MEB (Electrons secondaires) de KaN1C-3 et spectres associés ..	179
Fig. 67: Microphotographies de MEB (Electrons secondaires) de KaN1C-2 et spectres associés ..	180
Fig. 68: Microphotographies de MEB (Electrons secondaires) de KiS52B et spectres EDS associés	181
Fig. 69: Distribution des particules dans les matériaux de mélange (Dolapix ; Modèle Mie)	184
Fig. 70: Diagramme ternaire de granulations et leurs aptitudes à la fabrication des produits finis	185
Fig. 71: Détermination pratique de la limite de liquidité (WL) d'un matériau	188
Fig. 72: Diagramme de plasticité des matériaux argileux étudiés	189
Fig. 73: Courbe Proctor de matériaux de Kasangulu.....	193
Fig. 74: Composition chimique des kaolinites de Kingabwa dans le diagramme ternaire de Ligas et al.	199
Fig. 75: Diagramme binaire $Fe_2O_3-Al_2O_3$ des matériaux de Kingabwa	200
Fig. 76: Principe de diffraction des rayons-x par le réseau cristallin	201
Fig. 77: Diffractomètre Bruker D8 Advance-ULg, Géologie	203
Fig. 78: Cloche de saturation des préparations naturelles à l'éthylène-glycol (E.G.)	205
Fig. 79: Spectres RX classiques de préparations orientées de matériaux de Kasangulu	209
Fig. 80: Spectres RX classiques de préparations orientées de matériaux de Kingabwa	210
Fig. 81: Diffractogrammes des poudres désorientées de matériaux de Kasangulu	214
Fig. 82: Pseudo-3D des spectres RX (EG) des matériaux de Kasangulu	214
Fig. 83: Photos de lames minces du grès d'Inkisi	215
Fig. 84: Vue d'une masse rocheuse en altération au sein de la saprolithe à Nsaya-1.....	215
Fig. 85: Diffractogrammes des poudres désorientées des matériaux de Kingabwa.....	217
Fig. 86: Spectres RX des préparations orientées naturelles des matériaux de Kingabwa	217
Fig. 87: Diffractogrammes des préparations orientées des matériaux de Kingabwa	218
Fig. 88: Spectres IR de la kaolinite KGa-1 de Géorgie	220
Fig. 89: Spectres IR des minéraux du groupe de la kaolinite	221

Fig. 90: Spectres infrarouges des matériaux de Kasangulu	223
Fig. 91: Spectres infrarouges des matériaux de Kingabwa	224
Fig. 92: Superposition des spectres infrarouges de matériaux étudiés	226
Fig. 93: Fragmentation au laminoir des matériaux de Kingabwa et de Kasangulu.....	232
Fig. 94: Humidification des matériaux de Kingabwa et de Kasangulu	233
Fig. 95: Etirage sous vide des produits perforés de Kasangulu	234
Fig. 96: Colorations des briquettes expérimentales cuites	236
Fig. 97: Teneurs en eau de façonnage des briquettes expérimentales pleines.....	239
Fig. 98: Retraits au séchage des briquettes expérimentales pleines	242
Fig. 99: Variation de retraits des briquettes pleines avec la température de cuisson	246
Fig. 100: Perte de poids des briquettes pleines avec la température de cuisson	249
Fig. 101: Evolution de l'absorption d'eau avec le temps dans les briquettes pleines	254
Fig. 102: Evolution de l'Abs et de la MVS avec la température de cuisson	255
Fig. 103: Corrélation MVS-Abs des briquettes expérimentales	256
Fig. 104: Dispositif de mesures de la flexion et de la compression des briquettes	257
Fig. 105: Evolution de la résistance mécanique avec la température de cuisson	261
Fig. 106: Détermination de la température idéale de cuisson	263
Fig. 107: Les spectres rayons X des briquettes expérimentales	266
Fig. 108: Les minéraux des briquettes expérimentales	267
Fig. 109: Microphotographies de MEB (Electrons secondaires) et spectres associés de 1150Ka ..	270
Fig. 110: Textures des minéraux 1150Ka	271
Fig. 111: Spectres EDS associés aux textures des minéraux 1150Ka	272
Fig. 112: Fissuration de la pâte 1150Ka.....	273
Fig. 113: Mapping des éléments constitutifs de 1150Ka	274
Fig. 114: Photos des lames minces-1150Ka prises au microscope optique.....	275
Fig. 115: Vue globale et textures des minéraux 1050Ka	278
Fig. 116: Spectres EDS des minéraux 1050Ka	279
Fig. 117: Fissuration de la pâte 1050Ka.....	280
Fig. 118: Mapping des éléments constitutifs de 1050Ka	281
Fig. 119: Photos des lames minces-1050Ka prises au microscope optique.....	282
Fig. 120: Microphotographies de MEB (Electrons secondaires) et spectres associés de 1150Ki	283
Fig. 121: Paramètres de forme des particules des briquettes cuites.....	284
Fig. 122: Paramètres de tailles des particules des briquettes cuites	285
Fig. 123: Courbes cumulatives des particules des briquettes cuites	286
Fig. 124: Résistance mécanique à la compression des briques LTGS	297
Fig. 125: Quelques organismes unicellulaires	298
Fig. 126: Composantes du principe du développement durable	312

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Les communes et populations de la province de Kinshasa (1967 et 2004)	27
Tableau 2: Classification des substances minérales industrielles	43
Tableau 3: Principaux types des minéraux argileux	46
Tableau 4: Principaux secteurs d'utilisation de minéraux argileux.....	54
Tableau 5: Techniques d'analyses des minéraux argileux	56
Tableau 6: Prix de quelques types d'argiles	57
Tableau 7: Les produits céramiques et leurs matières premières.....	59
Tableau 8: Caractéristiques et utilisation des céramiques traditionnelles.....	60
Tableau 9: Les céramiques silicatées	61
Tableau 10: Composition chimique type pour la fabrication des céramiques domestiques.....	61
Tableau 11: Seuils granulométriques optimaux des matériaux en céramique	64
Tableau 12: Limites admissibles d'utilisation des argiles en céramique	65
Tableau 13: Composition minéralogique des argiles utilisées dans les briqueteries européennes.	67
Tableau 14: Terminologie des produits réfractaires	67
Tableau 15: Les substances utilisées dans la fonte des produits réfractaires	68
Tableau 16: Composition minéralogique des argiles en fabrication des tuyaux en grès	69
Tableau 17: Composition chimique des argiles en fabrication des tuyaux en grès.....	69
Tableau 18: Estimation de la plasticité d'un sol.....	71
Tableau 19: Etat du sol en fonction de la consistance	72
Tableau 20: Limites d'Atterberg et indices de plasticité de certains minéraux argileux.....	73
Tableau 21: Températures de cuisson usuelles des produits céramiques.....	87
Tableau 22: Phases minéralogiques formées au cours de la cuisson	91
Tableau 23: Sites d'échantillonnage des matériaux argileux.....	100
Tableau 24: Les teneurs en eau naturelle de matériaux naturels	137
Tableau 25: Les teneurs en matières organiques des matériaux naturels	139
Tableau 26: Qualification de sols sur base de l'Equivalent de Sable	139
Tableau 27: Résultats de l'équivalent de sable de matériaux naturels de Kasangulu.....	141
Tableau 28: Techniques d'analyse granulométrique utilisées.....	142
Tableau 29: Tarage des pycnomètres	144
Tableau 30: Etalonnage des cristallisoirs pour l'obtention de la teneur en eau	145
Tableau 31: Caractéristiques de l'aréomètre BII.....	147
Tableau 32: Poids volumique réel des échantillons analysés	147
Tableau 33: Teneur en eau et poids secs des échantillons analysés	148
Tableau 34: Mesures de l'aréomètre sur matériaux de Kasangulu	148
Tableau 35: Mesures de l'aréomètre sur matériaux de Kingabwa	149
Tableau 36: Les passants et refus cumulés des matériaux argileux de Kasangulu.....	149
Tableau 37: Les passants et refus cumulés des matériaux argileux de Kingabwa.....	150
Tableau 38: Résultats de la sédimentométrie des échantillons de Kasangulu.....	151
Tableau 39: Résultats de la sédimentométrie des échantillons de Kingabwa.....	152
Tableau 40: Quelques paramètres granulométriques des matériaux étudiés	155
Tableau 41: Fractions granulométriques des matériaux naturels de Kasangulu.....	159
Tableau 42: Fractions granulométriques des matériaux naturels de Kingabwa.....	159
Tableau 43: Pourcentages en argiles des matériaux de Kasangulu et de Kingabwa	162
Tableau 44: Paramètres de la distribution d'après le diamètre interne des particules	166
Tableau 45: Comparaison des pourcentages en argiles des différentes techniques	176

Tableau 46: Composition granulométrique des échantillons de mélange	183
Tableau 47: Poids des tares utilisées pour la détermination des limites d' Atterberg	186
Tableau 48: Les limites d'Atterberg des matériaux argileux des environs de Kinshasa	188
Tableau 49: Granulométrie et limites d'Atterberg des matériaux argileux étudiés	189
Tableau 50: Ordre de grandeur de paramètres proctor d'un sol	191
Tableau 51: Estimation de la qualité du malaxage d'un sol.....	191
Tableau 52: Pourcentages en éléments en trace métallique et pH des matériaux naturels.....	194
Tableau 53: Résultats (en pourcentage) d'analyse par fluorescence X	196
Tableau 54: Comparaison des argiles de Kingabwa aux kaolins commerciaux	198
Tableau 55: Composition chimique moyenne en éléments majeurs des argiles de Kingabwa et des kaolins commerciaux.....	198
Tableau 56: Comparaison des matériaux argileux de Kasangulu aux argiles-types de l'Europe....	200
Tableau 57: Principaux minéraux déterminables dans les spectres des poudres	207
Tableau 58: Position des raies (001 en Å) des principaux minéraux argileux.....	208
Tableau 59: Estimation semi-quantitative de la minéralogie totale.....	211
Tableau 60: Estimation semi-quantitative des minéraux argileux.....	212
Tableau 61: Fréquences d'absorption des radicaux des minéraux silicatés (KODAMA H., 1985) ..	222
Tableau 62: Bandes d'absorptions caractéristiques des radicaux des matériaux étudiés	225
Tableau 63: Paramètres de séchage des briquettes à la chambre 02	234
Tableau 64: Plages de température utilisées pour la cuisson des briquettes	235
Tableau 65: Colorations des produits de cuisson	236
Tableau 66: Teneurs en eau de façonnage des briquettes expérimentales de Kasangulu	237
Tableau 67: Teneurs en eau de façonnage des briquettes expérimentales de Kingabwa	238
Tableau 68: Retraits au séchage des briquettes expérimentales de Kasangulu (Ka)	240
Tableau 69: Retraits au séchage des briquettes expérimentales de Kingabwa (Ki)	241
Tableau 70: Retrait à la cuisson des briquettes expérimentales de Kasangulu (Ka)	244
Tableau 71: Retrait à la cuisson des briquettes expérimentales de Kingabwa (Ki)	245
Tableau 72: Perte de poids à la cuisson des briquettes expérimentales de Kasangulu	247
Tableau 73: Perte de poids à la cuisson des briquettes expérimentales de Kingabwa	248
Tableau 74: Absorption d'eau et porosité des briquettes expérimentales	252
Tableau 75: Les masses volumiques humide et sèche des briquettes expérimentales	253
Tableau 76: Vitesse d'application de la charge	258
Tableau 77: Résistance mécanique à la flexion des briquettes expérimentales	259
Tableau 78: Résistance mécanique à la compression des briquettes expérimentales	260
Tableau 79: Résistance mécanique à la compression des briques artisanales de Kasangulu	262
Tableau 80: Caractéristiques des briquettes stabilisées au ciment	263
Tableau 81: Composition minéralogique des briquettes cuites	268
Tableau 82: Indicateurs de construction (en pourcentage) dans quelques villes de la RD Congo.	291
Tableau 83: Variation du prix de ciment à Kinshasa	291
Tableau 84: Pouvoirs calorifiques des combustibles	302
Tableau 85: Briqueteries d'Afrique utilisant les déchets végétaux comme combustibles	303
Tableau 86: Autorisations exigées pour la recherche et l'exploitation des produits de carrière...	305
Tableau 87: Teneur en carbone de combustibles fossiles (Agence Internationale de l'Energie, 1991)	307

INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte

Le potentiel en ressources minérales est énorme en RD Congo. Ces ressources, réparties inégalement à travers les onze provinces du pays, sont diverses et comprennent les métaux de base (cuivre, cobalt, zinc, manganèse, fer, nickel, chrome,...), les substances précieuses (or, diamant, argent,...), les substances énergétiques qualifiées de réservées (uranium, palladium, radium,...) et les substances minérales industrielles (calcaire, gypse, kaolin,...).

Pour conserver son patrimoine naturel exceptionnel et exploiter durablement ses ressources minérales, la RD Congo a publié, en juillet 2002, un nouveau Code Minier qui vise d'une part, à attirer les investisseurs, et de l'autre, à limiter l'impact négatif des activités minières sur l'environnement.

Près de dix ans après cette promulgation du Code Minier, on constate que la quasi-totalité des investissements des sociétés minières nationales ou multinationales œuvrant en RD Congo est orientée vers les métaux de base et les substances minérales précieuses. La filière de la céramique pourtant très prometteuse et qui utilise, comme matières premières, les substances minérales industrielles (peu exploitées et faiblement étudiées), compte parmi les secteurs les moins développés et/ou inexistant dans la majeure partie du pays.

L'industrie céramique compte parmi les secteurs les plus gourmands en énergie ; la majorité des produits céramiques sont obtenus par frittage (cuisson), généralement entre 900 et 1500°C. La tendance actuelle dans cette industrie est de réduire au maximum la durée et la température du frittage des produits. L'optimisation des compositions des matières premières naturelles et/ou synthétiques et celle des procédés nécessaires à la fabrication de produits aux caractéristiques d'usage satisfaisantes sont au cœur des préoccupations.

De nombreuses pistes de recherches technologiques innovantes sont donc actuellement explorées et émergentes dans les pays développés (en Europe par exemple) pour la production des matériaux céramiques à faible énergie et peu émettrice des gaz à effet de serre.

Sur le continent africain, plusieurs pays possèdent des briqueteries et des tuileries qui sont opérationnelles et fonctionnent avec des fours alimentés par les déchets végétaux utilisés comme combustibles.

La ville-province de Kinshasa, capitale de la RD Congo en pleine reconstruction, est confrontée à de sérieux problèmes de logement de ses habitants dont le nombre est estimé à plus ou moins 10 millions. En tant que logement, l'habitation constitue un élément fondamental du bien-être physique, psychologique, social et économique des ménages.

Cette grave crise à laquelle fait face la ville de Kinshasa est notamment due à l'explosion démographique et au faible pouvoir d'achat de la majeure partie des populations vis-à-vis des coûts faramineux des matériaux de construction de bonne qualité. L'initiative de la production des logements est laissée aux privés, dans la majorité des cas en auto-construction sans aucune assistance. Les populations habitant les quartiers les plus étendus de Kinshasa ne disposent pas des infrastructures et services de base, ce qui engendre un délabrement du tissu urbain et la dégradation du cadre de vie (précarité des logements, manque des infrastructures et équipements collectifs, ...).

Eu égard à cette détérioration des conditions d'habitat dans les villes congolaises, il s'est avéré indispensable de doter le Gouvernement du pays d'un Plan d'Action National pour l'Habitat (PANH) en vue de procéder à l'identification et à la programmation adéquate des mesures, des actions et des stratégies à mettre en œuvre à court, moyen et long termes. La promotion des matériaux locaux de construction y a été retenue et classée parmi les actions prioritaires d'urgence.

Il aurait fallu construire près de 15.000 logements par an à partir de l'an 2000 pour résorber le déficit de logement dans la province de Kinshasa. Ce qui aurait fourni environ 58.500 logements en 2004 pour la ville de Kinshasa. Et aujourd'hui en 2012, force est de constater qu'aucune avancée significative n'est encore observée dans ce sens (Ministère Trav. Publ. Am. Urb. Hab et PNUD, 2000).

Compte tenu de son importance et son impact visible, le secteur de logement fait également parti du volet "Reconstruction" des "cinq chantiers" du Gouvernement du Président Joseph Kabila.

Localement, les produits en terre cuite offerts sur le marché de la province de Kinshasa sont essentiellement des briques pleines de mauvaises qualités (peu esthétique, faibles résistances, ...) provenant des briqueteries artisanales (par exemple Kasangulu) qui ont recourt aux fours de campagnes alimentés aux bois de chauffe. Cette exploitation artisanale des matériaux argileux est saisonnière et n'est pas encadrée par le pouvoir public. Mais, bien que présentant des avantages vis-à-vis des exploitants, cette activité est susceptible d'occasionner des graves dégradations de certaines composantes biophysiques de l'environnement régional.

Elle mérite d'être soutenue en vue de l'amélioration de la qualité des produits finis mis sur les marchés kinois et environnants.

A part Congo-Briques (Ex-Briqueterie de Kinshasa), les véritables installations industrielles pour la fabrication des produits céramiques n'existent pas dans la province de Kinshasa et environs. La Congo-Briques se trouve dans un état de délabrement total, délabrement accentué par la vétusté de son outil de production, la perte de ses concessions de matières premières, le lotissement d'une partie de son espace de production et la crise de confiance de sa clientèle.

Ainsi, même si une partie des produits de la céramique grossière est fabriquée sur place à Kinshasa pour raison de construction, ceux du secteur réfractaire et de la branche céramique fine, traditionnelle et industrielle, sont tous importés. Quand bien même le marché soit favorable, cette importation des produits céramiques est marginale à cause de la forte demande et des coûts élevés de transport des produits.

La valorisation des ressources naturelles locales en vue de la production locale des matériaux céramiques de bonne qualité dans la province de Kinshasa et environs trouve donc tout son intérêt et constitue un des atouts importants du processus de développement durable dans cette région.

C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente dissertation qui concerne, dans une perspective de développement local durable et de la valorisation des ressources naturelles locales, la caractérisation fine et technologique des matériaux argileux extraits des carrières des environs de Kinshasa. Ces matériaux, exploités de façon artisanale par les populations locales, n'ont fait à ce jour l'objet d'aucune étude scientifique de caractérisations physico-chimiques appropriées.

2. Objectifs et intérêt scientifique du sujet

Cette étude constitue un apport scientifique important dans la connaissance et la caractérisation des substances minérales industrielles de la RD Congo et plus particulièrement les matériaux argileux de la province de Kinshasa et environs.

Elle a l'avantage de contribuer à la promotion des matériaux locaux de construction tout en améliorant la qualité des briques artisanales produites, à inciter la création des Petites et Moyennes Entreprises (PME) dans la filière de la céramique en RD Congo et de s'intégrer dans le projet visant à réviser la carte géologique de la Province de Kinshasa.

En analysant et en testant scientifiquement les échantillons extraits des sites d'étude grâce à des techniques et équipements modernes, cette recherche apporte des réponses à certaines questions d'intérêt fondamental et/ou appliqué.

En voici quelques exemples :

- le sol disponible sera-t-il un bon matériau de construction ? Est-il adapté à la production de blocs en terre stabilisée ? de briques en terre cuite ? ou des tuiles ? Quel est le mélange idéal des matières premières ? Quel est le meilleur stabilisant et dans quelles proportions ?
- quelle est la résistance des produits finis ? L'augmentation ou la diminution de cette propriété mécanique des produits céramiques cuits à différentes températures est-elle totalement dépendante de la porosité, des retraits à la cuisson ou de la quantité de mullite qui s'y trouve ?
- quels sont d'autres secteurs potentiels de valorisation des matériaux naturels analysés ?

3. Matériels et méthodes

3.1. Matériels

Pour mener à bien cette recherche, les principaux matériels utilisés sont :

- des granulomètres laser Malvern Mastersizer 2000 et Occhio 500nano ainsi que divers appareils d'identification géotechnique d'un sol ;
- un diffractomètre Brucker D8-Advance ($K\alpha Cu \lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) et un spectromètre Nicolet NEXUS pour l'étude minéralogique des matières premières;
- un spectromètre de fluorescence par rayons X ARL 9400 XP et un spectroscope d'absorption atomique Perkin-Elmer pour le dosage des éléments majeurs et métaux en trace;
- une étireuse sous vide, un séchoir à chambres couplé à un système de brassage d'air « Dual Air Jets » et un four électrique de marque Keller relié à un automate programmable de l'unité de production industrielle AFMA de CERATEC pour la fabrication des briquettes expérimentales;
- un appareil Instron 5585 comprenant un logiciel de type Merlin pour la détermination des résistances mécaniques des produits finis fabriqués ;
- des microscopes optique Olympus BX 60 et électronique à balayage (MEB) Philips XL-30 pour la détermination minéralogique de matériaux naturels et la caractérisation texturale ou morphologique de minéraux de briquettes cuites;
- le logiciel du Système d'Information Géographique (SIG) en l'occurrence le MapInfo 8.5 pour l'analyse et la visualisation des informations des cartes de la province de Kinshasa et environs ;

- les différents outils utilisés sur terrain (cartes, jeep, GPS, pioche, tarière, double décamètre, marteau et boussole de géologue,...) pour la description et l'échantillonnage des lithofaciès des matériaux naturels.

3.2. Méthodes

Pour atteindre les objectifs visés dans ce travail, la méthodologie utilisée pour l'ensemble des travaux, terrain et caractérisations en laboratoires, est résumée dans le schéma de la figure n°1. Des contacts ont été pris avec les entrepreneurs du secteur étudié et avec les services et/ou institutions locales ou non. Il s'agit notamment du Centre de Recherches Géologiques et Minières (CRGM), de la Cellule Technique de Coordination et de Planification Minière (CTCPM), du Cadastre Minier (CAMI), de l'Office des Routes (OR), de la Société de Bouteillerie de Kinshasa (BOUKIN), de la Société Générale Industrielle (SGI), de Congo-briques (Ex-Briqueterie de Kinshasa : BRIKIN), des missions catholiques, du Ministère des Travaux Publics, Aménagement du territoire, Urbanisme et Habitat, du Musée Royal d'Afrique Centrale (MRAC), du CERATEC et de l'Université de KUL.

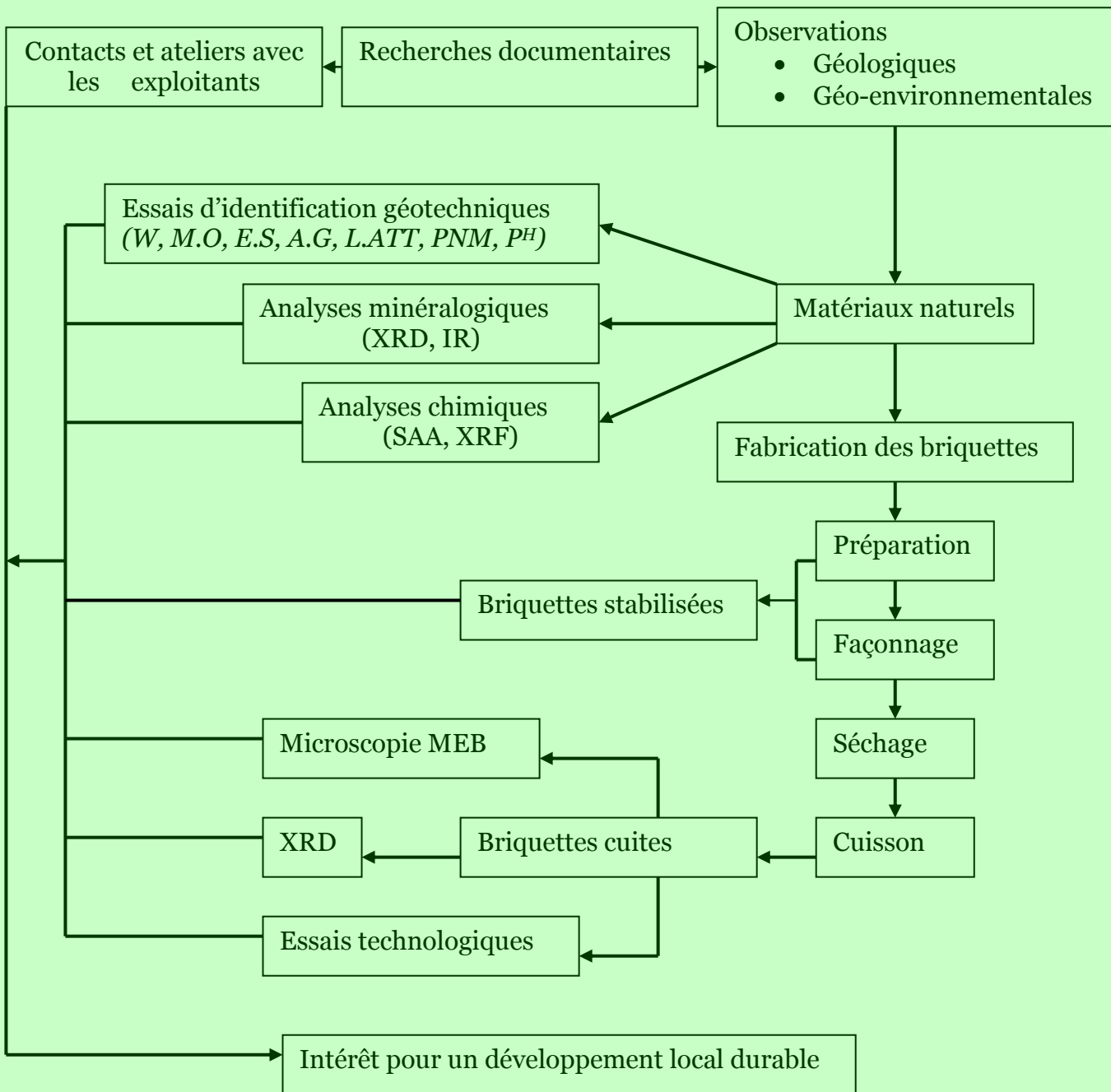


Fig. 1: Schéma de la méthodologie utilisée

W : teneur en eau naturelle ; M.O : Teneur en matières organiques ; E.S : Equivalent de Sable ; A.G : Analyse granulométrique ; L.ATT : Limites d'Atterberg ; PNM : Proctor Normal Modifié ; pH : Potentiel d'hydrogène ; XRD : Diffraction des rayons X ; IR : Infrarouge ; SAA : Spectroscopie d'absorption atomique ; XRF : Fluorescence X et MEB : Microscopie électronique à balayage.

4. Subdivision du travail

La présente dissertation est structurée en six chapitres précédés par une introduction générale qui aborde le contexte du sujet, les objectifs et intérêt scientifique, les matériels et méthodes utilisées pour atteindre lesdits objectifs.

Le premier chapitre est une présentation succincte des cadres géographique et géologique de la zone d'étude.

Le deuxième chapitre est consacré à un aperçu bibliographique des substances minérales industrielles et plus particulièrement les minéraux argileux et les produits céramiques qui en dérivent.

Le troisième chapitre présente les travaux d'échantillonnage des matériaux naturels et les observations géo-environnementales effectuées dans les sites d'exploitation artisanale ou industrielle.

Le quatrième chapitre se rapporte aux travaux de caractérisations physico-chimique, géotechnique et minéralogique des matériaux naturels dans le but d'identifier le(s) secteur(s) de valorisation industrielle approprié (s).

La fabrication et les caractéristiques technologiques des briquettes expérimentales stabilisées et cuites à différentes températures sont abordées au cinquième chapitre.

L'intégration et l'interprétation des résultats acquis sur terrain et en différents laboratoires ont permis de déterminer l'intérêt que présente cette recherche vis-à-vis du processus de développement local durable. Le sixième chapitre procède de cette préoccupation.

Des conclusions générales qui synthétisent les principaux résultats obtenus et les perspectives scientifiques appliquées offertes par cette recherche clôturent ce travail.

CHAPITRE I : CONTEXTES GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

I.1. Introduction

Sont présentés dans ce chapitre, les traits majeurs de la zone d'étude qui comprend la province de Kinshasa et le territoire de Kasangulu au Bas-Congo. Il s'agit de la localisation géographique, de la population et habitat, de la topographie, du climat, de l'hydrographie, des sols, de la végétation et du contexte géologique régional.

Ces éléments de base sont nécessaires à la compréhension de l'importance de certaines problématiques abordées dans le cadre de cette recherche. Les besoins en matériaux de construction et le nombre de population en est un exemple.

I.2. Cadre géographique

I.2.1. Province de Kinshasa

I.2.1.1. Localisation et statut administratif

La Province de Kinshasa est située à l'ouest de la République Démocratique du Congo entre 3,9 et 5,1 degrés de latitude sud et entre 15,2 et 16,6 degrés de longitude est. D'une superficie de 9.984,5 Km², soit 0,42% celle du pays, elle est limitée à l'est et au nord-est par la Province de Bandundu, au sud et au sud-ouest par celle du Bas-Congo et au nord-ouest par le fleuve Congo (au niveau du Pool Malebo), frontière naturelle avec la République sœur du Congo Brazzaville.

Ancienne Léopoldville jusqu'en 1966, Kinshasa est la capitale et la plus grande ville de la RD Congo. Elle forme une entité administrative à statut particulier, à la fois ville et province, et joue le rôle de centre administratif, politique (siège des institutions du pays), économique et culturel de la RD Congo. C'est donc une ville multiethnique (Fig.2).

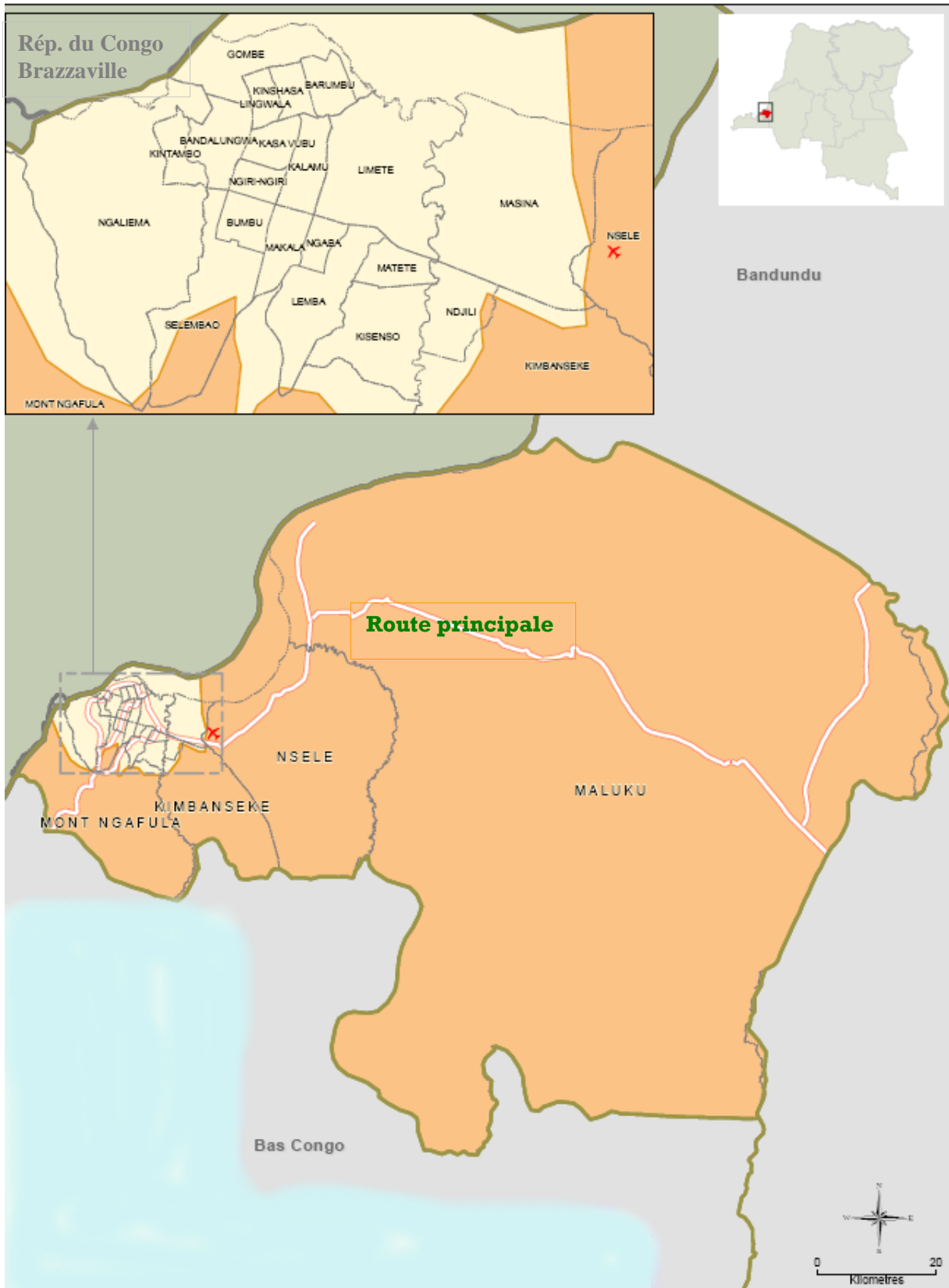


Fig. 2: Présentation de la province de Kinshasa (OCHA, 2011)

I.2.1.2. Population et Habitat

En 1945, la capitale du Congo belge abritait 100.000 personnes. A l'indépendance, en 1960, Léopoldville comptait 400.000 âmes, ce qui en faisait la plus grosse agglomération d'Afrique centrale. Quinze ans plus tard, après que la ville eut reçu le nom de Kinshasa en 1966, sa population avait déjà franchi le cap des 2 millions. Elle a crû de manière considérable, passant donc de 500.000 habitants à la fin des années 1960, à 4.131.845 en 1998 et à 8,2 millions à 2007.

Le recensement administratif de 2009 a estimé la population de Kinshasa à environ dix millions d'habitants. Selon certaines projections, la population de Kinshasa pourrait atteindre plus de 12 millions d'habitants en 2015.

Les projections démographiques de l'hôtel de ville de Kinshasa (2007) estiment qu'en 2037, la ville comptera plus de 20 millions d'habitants lorsque la RD Congo en aura 100 millions. Elles évaluent le taux de croissance annuelle de la capitale à 5% dont 4,5% d'accroissement naturel et 0,5% de solde migratoire depuis le déclenchement successif des guerres à l'est (Min. Trav. Publ. Am. Urb. Hab et PNUD, 2000 ; DELBART V., 2000 ; Min. Plan, 2004 ; DE SAINT-MOULIN L., 2001 et 2007 ; LELO NZUZI F., 2008).

Appelés « Kinois », les habitants de la ville de Kinshasa sont actuellement répartis dans les 24 communes qu'elle comprend (Fig.3 et Tabl. 1).

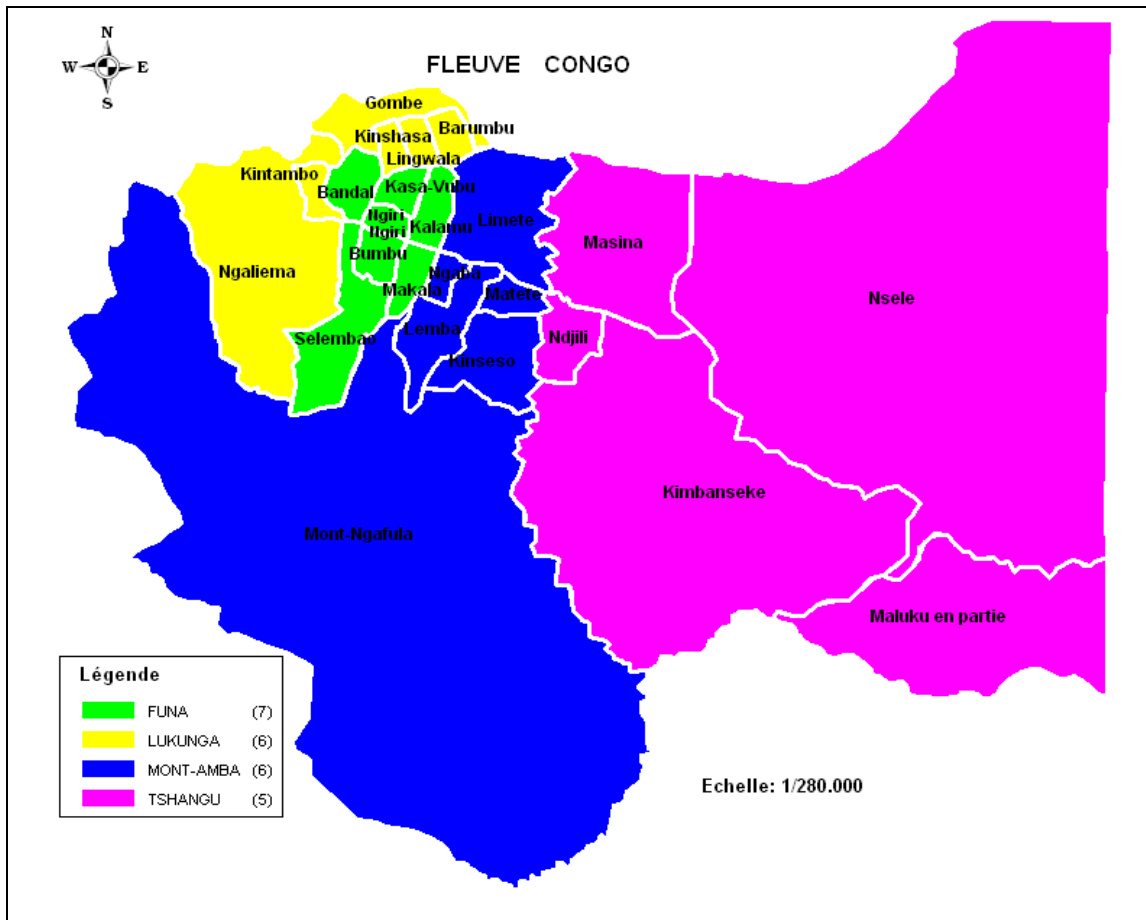


Fig. 3: Les districts administratifs de la province de Kinshasa

Tableau 1: Les communes et populations de la province de Kinshasa (1967 et 2004)

District	Communes	Superficie en km ²	Population en 1967	Population en 2004	Densité au km ² en 1967	Densité au km ² en 2004	Nombre de quartiers
Tshangu	Ndjili	11,40	80.000	442.138	7.017	38.784	13
	Kimbanseke	237,78	64.440	946.372	271	3.980	30
	Masina	69,73	18.700	485.167	268,2	6.957	21
	Nsele	898,79	-	140.929	-	156.800	15
	Maluku	7.948,80	-	67.450	-	8	19
	Total	9.166,5	163.140	2.082.056	17,8	227	99
Mont-Amba	Mont-Ngafula	358,92	2.040	261.004	5,7	727	16
	Lemba	23,70	37.480	349.838	1.581	14.761	15
	Kisenso	16,60	26.320	386.131	1.586	23.260	17
	Limite	67,70	28.270	375.726	418	5.549	14
	Matete	4,88	42.220	268.781	8.665	55.078	13
	Ngaba	4,0	17.810	180.650	4.453	45.162	6
	Total	475	318.280	1.822.130	670	3.836	81
Lukunga	Kintambo	2,72	29.890	106.772	10.989	39.254	8
	Lingwala	2,88	37.240	94.635	12.930	32.859	9
	Kinshasa	2,87	56.640	164.857	19.735	57.441	7
	Barumbu	4,72	44.900	150.319	9.512	31.847	9
	Gombe	29,33	17.890	32.373	610	1.103	10
	Ngaliema	244,30	30.640	683.135	125	2.796	21
	Total	286,82	217.200	1.232.091	752	4.295	64
Funa	Kalamu	6,64	78.310	315.342	11.793	47.491	18
	Kasa-vubu	5,04	56.540	157.320	11.218	31.214	7
	Ngiri-Ngiri	3,40	50.930	174.843	14.979	51.424	8
	Bandalungwa	6,82	45.220	202.341	6.630	29.668	7
	Bumbu	5,50	37.560	329.234	6.829	59.860	13
	Makala	5,60	37.200	253.844	6.643	45.329	14
	Selembao	23,18	55.150	335.581	2.379	14.477	18
	Total	56,18	360.910	1.768.505	60.471	31.479	85
Total ville	9.984,50	1.059.530	6.904.782	106,1	691,55	329	

Rien que sur le plan de l'habitat, Kinshasa est une ville très contrastée avec des secteurs résidentiels et commerciaux chics au centre-ville (Fig.4), des universités, et des taudis informels coexistent et des vastes zones rurales envahissent parfois la ville au point de retrouver maraîchers et élevages en ville.



Fig. 4: Vue partielle de la commune de la Gombe à Kinshasa

Les cités d'extension, par exemple les communes de Maluku et Nsele situées à l'extrême est de la ville sont urbano-rurales. Ces deux communes couvrent 86% de la superficie totale de Kinshasa, soit 77% pour la première et 9% pour la seconde. Il s'agit des zones jadis rurales qui faisaient partie du Territoire de Kasangulu au Bas-Congo (LELO NZUZI F., 2008). Ces deux communes sont marquées par la présence de baraques qui sont en fait des constructions d'attente. Ce sont des installations provisoires (15 à 20 m²) à base de matériaux de récupération, en pisé ou en briques adobes. Elles se métamorphosent au fur et à mesure que le propriétaire trouve des moyens pour construire une maison en parpaings.

C'est donc une ville de demain pour les Kinois.

L'accroissement naturel, l'exode rural et l'incorporation dans la ville des périphéries rurales sont les causes de la dynamique de l'habitat et du développement de Kinshasa qui est de plus en plus peuplée et de plus en plus étendue : 570.364 ménages, 562.969 unités de logement et 519.117 unités de bâti au tournant du millénaire (KANENE M., 2001).

Dans la ville Province de Kinshasa, le mode d'accès au logement le plus utilisé est l'autoconstruction (80%) : 67% de l'autoconstruction est l'œuvre des populations à faibles revenus, 10% concernent la catégorie intermédiaire et 2,5% pour la classe sociale élevée (Min. Trav. Publ. Am. Urb. Hab et PNUD, 2000). Le plan national pour l'habitat (1999) a répertorié 113.841 maisons inachevées, 30.440 maisons qui sont

des constructions précaires, 2.305 maisons qui sont des bidonvilles et 7.398 maisons dans des zones érodables. Le temps que met un Kinois pauvre pour construire sa maison d'une valeur moyenne de 6.600\$ (soit 67\$/mois) est estimé à 17 ans.

Selon la même étude, il aurait fallu construire près de 15.000 logements par an à partir de l'an 2000 pour résorber ce déficit. Ce qui aurait fourni environ 58.500 logements en 2004 pour la ville de Kinshasa. Et aujourd'hui en 2011, force est de constater que rien n'est fait dans ce sens.

C'est pourquoi, selon LELO NZUZI (2008), Kinshasa traverse une grave crise : celle relative à la dégradation de l'environnement et laquelle engendre la détérioration de la qualité et du cadre de vie dans l'espace urbain. Et le lien est bien connu entre la dégradation de l'environnement et celle de la santé.

La valorisation des ressources naturelles locales en vue de la production locale des matériaux de construction de bonne qualité dans la province de Kinshasa et environs trouve donc tout son intérêt et constitue un des atouts importants du processus de développement durable dans cette région.

I.2.1.3. Topographie

Construite sur une vaste dépression au bord du fleuve Congo (Le Pool Malebo), la ville de Kinshasa possède un relief qui ressemble à un amphithéâtre. Ce relief est formé d'un plateau à l'est (Plateau des Bateke), d'une chaîne des collines (350 à 675m d'altitude) au sud (Kimwenza) et à l'ouest (Ngaliema), d'une plaine au nord et des zones marécageuses qui bordent le fleuve Congo au nord. Ces marécages qui côtoient le fleuve Congo au tour du Pool Malebo s'élargissent à l'est de la rivière Ndjili dans une vaste plaine alluviale.

La plaine, dont l'altitude est comprise entre 300 et 330m, se présente sous la forme d'un croissant, longeant le fleuve par sa face concave, avec une surface d'environ 100km². Elle est divisée en deux entités par la rivière Ndjili : la Plaine de Lemba, à l'ouest, avec une surface légèrement ondulée et la Plaine de la Nsele, à l'est. Cette dernière présente une surface plutôt plane, sillonnée de nombreuses rivières qui coulent quasi parallèlement du sud-est vers le nord-ouest pour se jeter dans le fleuve Congo (DE MAXIMY R. et VAN CAILLIE X., 1974 ; NDEMBO LONGO J., 2009).

L'espace urbain de Kinshasa est construit sur un site topographique contrasté : plaine (la ville basse) et collines (ville haute) (LELO NZUZI F., 2008).

La ville basse est composée des communes de Gombe, Limite, Lingwala, Barumbu, Kasa-Vubu, Ngiri-Ngiri, Lemba, Ndjili, Matete, Kalamu, Bandalungwa, Ngaba, Masina, Makala et Kinkole-Nsele. Ces communes sont regroupées en cités européennes (Gombe, Limite, ...), indigènes anciennes, nouvelles ou planifiées (par exemple Kinshasa, Barumbu, Kintambo, Ngiri-Ngiri, ...) et celles d'extension (Masina, Maluku, Nsele,...).

L'espace collinaire est dominé par les cités de haut standing d'avant et d'après 1970 (communes de Ngaliema, Mont-Ngafula et sud de Lemba), et par les cités populaires plus ou moins d'autoconstruction également construites sur les pentes des collines (communes de Kisenso, sud de Selembao et Bumbu).

I.2.1.4. Climat

La province de Kinshasa fait face à un climat tropical chaud et humide de type AW4 selon la classification de Koppen. Il est caractérisé par une grande saison de pluies d'une durée de 8 mois (mi-septembre à mi-mai) entrecoupée d'une petite période sèche à cheval sur janvier et février, et d'une saison sèche de courte durée pendant le reste de l'année (LELO NZUZI F., 2008).

Selon les données météorologiques de 46 ans (de 1961 à 2007) enregistrées au niveau de la station de Binza située à l'ouest de Kinshasa, il apparaît que (NDEMBO LONGO J., 2009) :

- le module pluviométrique moyen est de 1450mm pour 112 jours de pluies ;
- le mois de novembre est celui au cours duquel la pluviométrie mensuelle est généralement la plus élevée, avec en moyenne 257mm ; environ 40% des précipitations tombent au courant des mois d'octobre, novembre et décembre ;
- la pluviométrie est très faible en saison sèche (juin : 5,5mm ; juillet : 2,0mm ; août : 5,8mm et septembre : 31,8mm) ;
- la température moyenne s'élève à 25°C avec une moyenne minimale de 21°C (en juillet) et une moyenne des maximums à 30°C (en avril).

Le module pluviométrique moyen de la ville calculé au cours de cette période est de 1502mm sur l'ensemble de quatre stations météorologiques de Kinshasa : Binza/Météo (secteur ouest), Aéroport de Ndjili (secteur est), Ndolo (secteur nord) et Mont-Amba (secteur sud).

D'une manière générale, l'humidité relative de l'air présente une moyenne qui gravite autour de 80%. Des brouillards matinaux tombent souvent pendant la saison sèche ; les vents dominants viennent du nord-est en saison de pluies avec une

vitesse inférieure à 3,5m/s et sud-ouest en saison sèche avec une vitesse maximale de 30m/s.

I.2.1.5. Hydrographie

Le réseau hydrographique de Kinshasa est dense. Il est constitué par:

- le fleuve Congo qui s'étend sur plus de 20km de large au niveau du Pool Malebo, avant les rapides de Kinsuka à l'ouest de la ville ;
- plusieurs rivières de vallées envasées, allogènes (Ndjili, Nsele) ou non (Tshangu, ...) et celles de vallées encaissées dites rivières locales (exemples : Lubudi, Funa, Bumbu, ...). Ces rivières sont des gabarits différents mais de direction généralement sud-nord (LELO NZUZI F., 2008 ; NDEMBO LONGO J., 2009).

I.2.1.6. Végétation

La végétation est, d'une manière générale, constituée de savanes parsemées d'arbustes et entrecoupées de galeries forestières de faibles densités et superficies.

La forêt naturelle a complètement disparu à ce jour au niveau de la partie intra-urbaine laissant la place aux habitations humaines, aux industries, aux fermes, aux espaces maraîchers, etc. Les versants des collines sont cependant couverts de forêts secondaires issues des actions de reboisement et de cultures des arbres fruitiers

La végétation marécageuse pousse dans le Pool Malebo (LELO NZUZI F., 2008 ; NDEMBO LONGO J., 2009).

I.2.1.7. Sols

La plus grande partie de la ville de Kinshasa est recouverte d'un manteau plus ou moins épais de matériaux sableux et sablo-argileux de teinte jaune, brun-clair et quelque fois rougeâtre (LELO NZUZI F., 2008 ; NDEMBO LONGO J., 2009).

Dans le plateau des Bateke, le sable recouvre des roches silicifiées ou grès polymorphes, tandis que dans la zone des collines et celle de plaine, le recouvrement sableux se retrouve sur du grès plus ou moins induré, ou sur un banc argileux. Cependant, vers le sud-ouest des collines, il y a, par endroit, un mélange de sols sableux et d'autres sols à tendance kaolinique ou ferrallitique.

Dans la zone de plaine, on rencontre des sols alluvionnaires à texture variable et des podzols ; les sols organiques sont localisés au niveau du Pool Malebo et des podzols.

1.2.2. Territoire de Kasangulu

Avec les territoires de Madimba et de Kimvula, Kasangulu fait partie du District de la Lukaya de la province du Bas-Congo en RD Congo. Les limites territoriales de Kasangulu sont (Fig.5):

- la commune urbano-rurale de Mont-Ngafula de la ville de Kinshasa au nord ;
- les communes de Maluku et de Nsele de la même ville à l'est ;
- la République du Congo Brazzaville ceinturée par le fleuve Congo à l'ouest ;
- le territoire de Madimba au sud.

D'une superficie de 4.680km², le territoire de Kasangulu est structuré administrativement en quatre entités qui comprennent la cité de Kasangulu et les secteurs de Kasangulu, Luila et Lukunga-Mputu.



Fig. 5: Localisation du Territoire de Kasangulu au Bas-Congo (OCHA, 2011)

Ce territoire est longé par le fleuve Congo sur environ 98km dans son bief non navigable à cause des rapides. Dans cette zone, le fleuve Congo est alimenté par les cours d'eau comme Mfuti, Lowa, Kaloma, Luila et Budisi.

Aucune station météorologique n'est installée dans le territoire de Kasangulu. Mais les données météorologiques enregistrées sur une station de Kinshasa (Binza/Météo) située à quelques kilomètres de la cité de Kasangulu permettent d'assimiler le cadre

climatique de ce territoire à celui de la partie sud de la province de Kinshasa : climat tropical chaud et humide influencé par les caractéristiques topographiques locales (zone collinaire : 450 à 550m d'altitude).

I.3. Cadre géologique

Le cadre géologique de la zone d'étude, située dans la Feuille de Léopoldville (Fig.6), est peu connu dans son ensemble. Les informations détaillées dans ce travail sont basées sur les anciens travaux géologiques et de sondages ainsi que les rapports de fin de travaux de forages d'eau effectués par diverses entreprises pour la recherche des nappes aquifères entre 1987 et 2001.

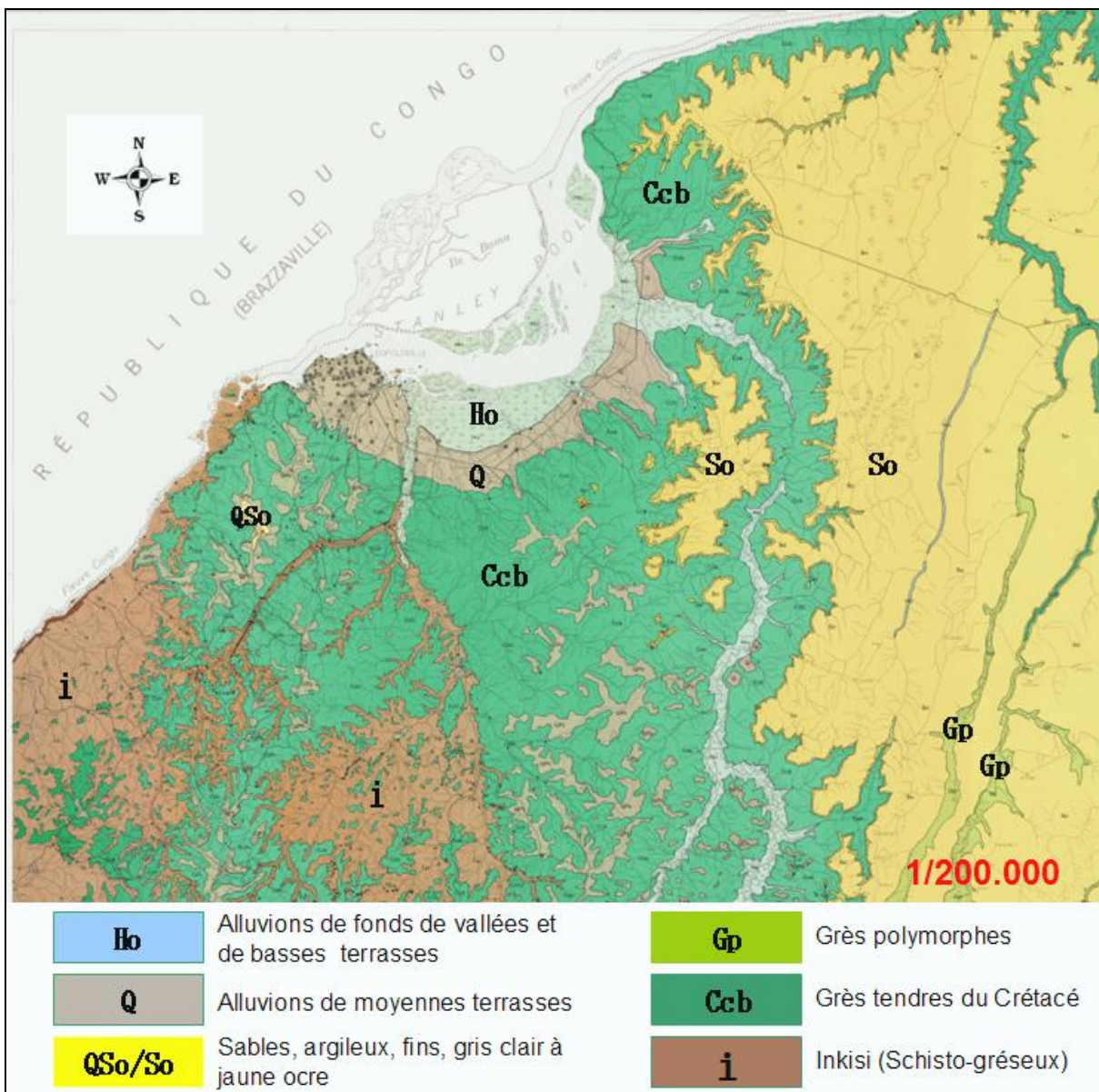


Fig. 6: Extrait de la carte géologique du degré carré S5/15 (SERVICE GEOL., RD CONGO, 1964)

I.3.1. Lithostratigraphie et faciès géologiques

L'interprétation des résultats de sondages (1119, répartis en quasi-totalité sur le centre de la province de Kinshasa dont 400 disposeraient des coupes géologiques) couplée à quelques travaux de terrain a permis de subdiviser cette zone en deux parties : les terrains du soubassement et les terrains de couverture, tous sédimentaires et vont du Protérozoïque au Quaternaire (EGOROFF S., 1955 ; VAN CAILLIE, 1987; TACK L., 2000).

I.3.1.1. Terrains de couverture

Les terrains de couverture regroupent les formations du Quaternaire, du Cénozoïque et celles du Mésozoïque.

Les Formations du Quaternaire vont de Holocène à Pliocène et sont constituées des alluvions de fond des vallées, des basses et de moyenne terrasses. On trouve ensuite les sables de la Lemba, les limons, les colluvions, les sables fins à très grossiers et les sables kaolineux de couleur gris clair à jaune ocre. Ils proviennent en grande partie du remaniement, au Pliocène et au Pléistocène, de la série de sables ocre et de la série de grès polymorphes.

Les Formations du Cénozoïque sont composées de deux séries :

- la série de sables ocre (0-30m) du Néogène (Kalahari supérieur) qui renferment des roches meubles, à peine cohérente, constituées des sables très fins mal classés, de teinte gris clair en surface, jaune ocre à rouge dans la masse et peu argileux;
- la série des grès polymorphes (0-2m) du Paléogène (Kalahari inférieur) qui comprend les sables, les meulière (grès polymorphes), et les calcaires. Cette série représente le sommet silicifié du grès tendre d'épaisseur irrégulière ne dépassant pas 2 mètres et se présentant en dalles étendues, fissurées et ravinées au sommet.

Les Formations du Mésozoïque comprennent:

- les grès tendres (0-30m) du Crétacé de couleur généralement blanchâtre. A d'autres endroits on a des grès tendres qui sont rouges à jaune violacé, mauves ou diversement colorés, souvent à galets, rares argilites rouges ou brunes et conglomératique à la base. On trouve aussi le grès crétacique indifférencié dont la limite est encore inconnue ;
- les grès marneux (0-15m) du Jurassique supérieur qui se trouveraient sur la plaine de Kinshasa ; ils contiennent des grès tendres et des argiles plus ou moins schisteuses qui ont montré la présence de quelques fossiles.

I.3.1.2. Terrains du soubassement

Les terrains du soubassement sont constitués par les grès d’Inkisi qui présentent plusieurs lithofaciès dont le faciès feldspathique. A Kinshasa, cette roche affleure aux cotes 275 mètres à la sortie du Pool Malebo à l’ouest de la ville et 300 mètres à Ndjili Brasserie à l’Est de la ville de Kinshasa. Elle fait partie des sédiments silico-clastiques du Néoprotérozoïque du Supergroupe West Congolien (Bas-Congo) appartenant à la chaîne Pan Africaine West Congo (TACK L. et al., 2001 ; HARTWIG E.F. et al., 2006) (Fig.7). Cette appartenance du Groupe d’Inkisi au Précambrien est actuellement sujette à des discussions scientifiques. Il pourrait faire partie des roches sédimentaires du début du Paléozoïque.

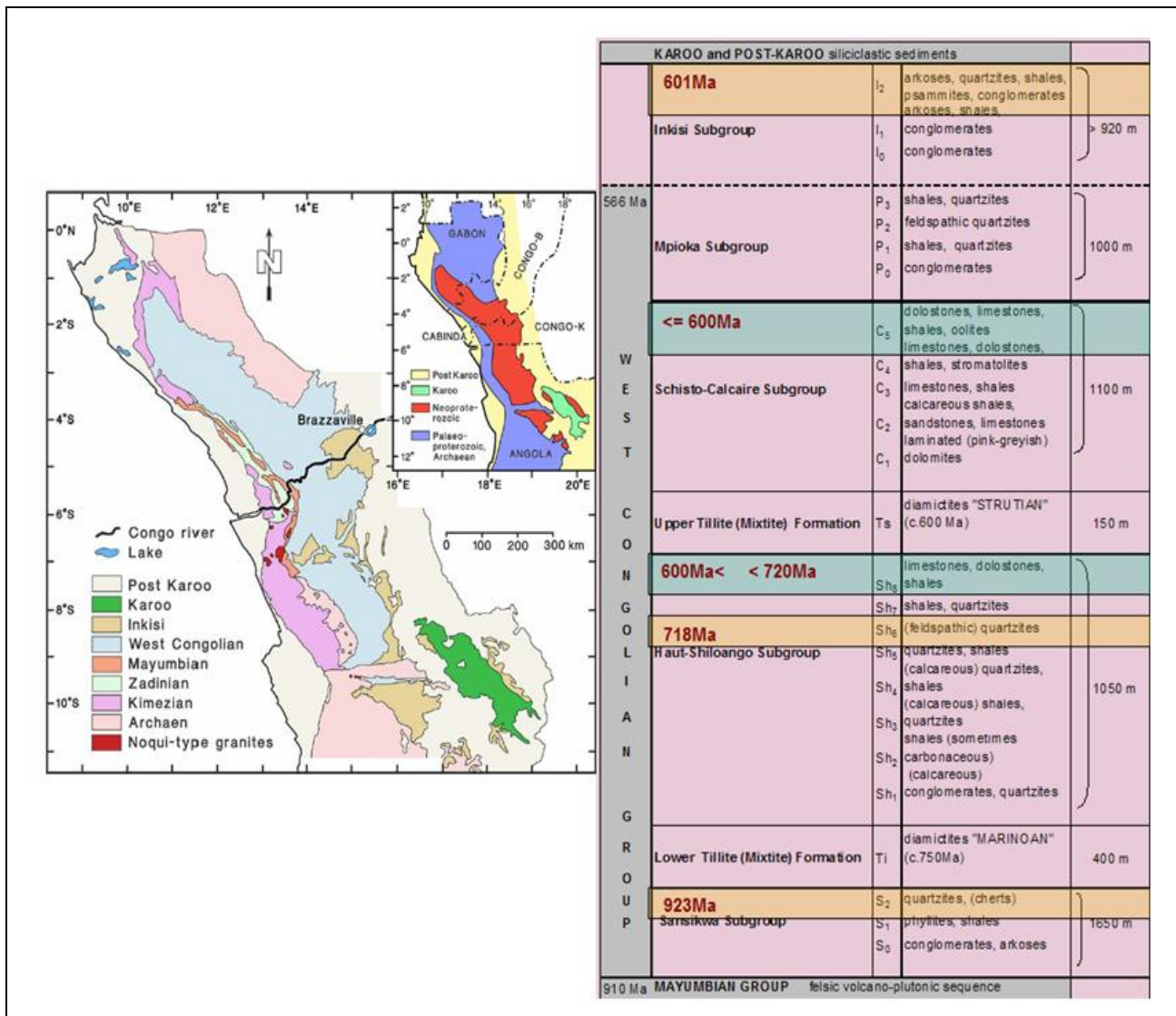


Fig. 7: Position stratigraphique et localisation du Groupe d’Inkisi (TACK L. et al., 2001)

I.3.1.3. Faciès géologiques

Les faciès géologiques de Kinshasa sont globalement repris sur la figure n°8 qui représente un extrait de l'esquisse géologique du Congo (EGOROFF S., 1955).

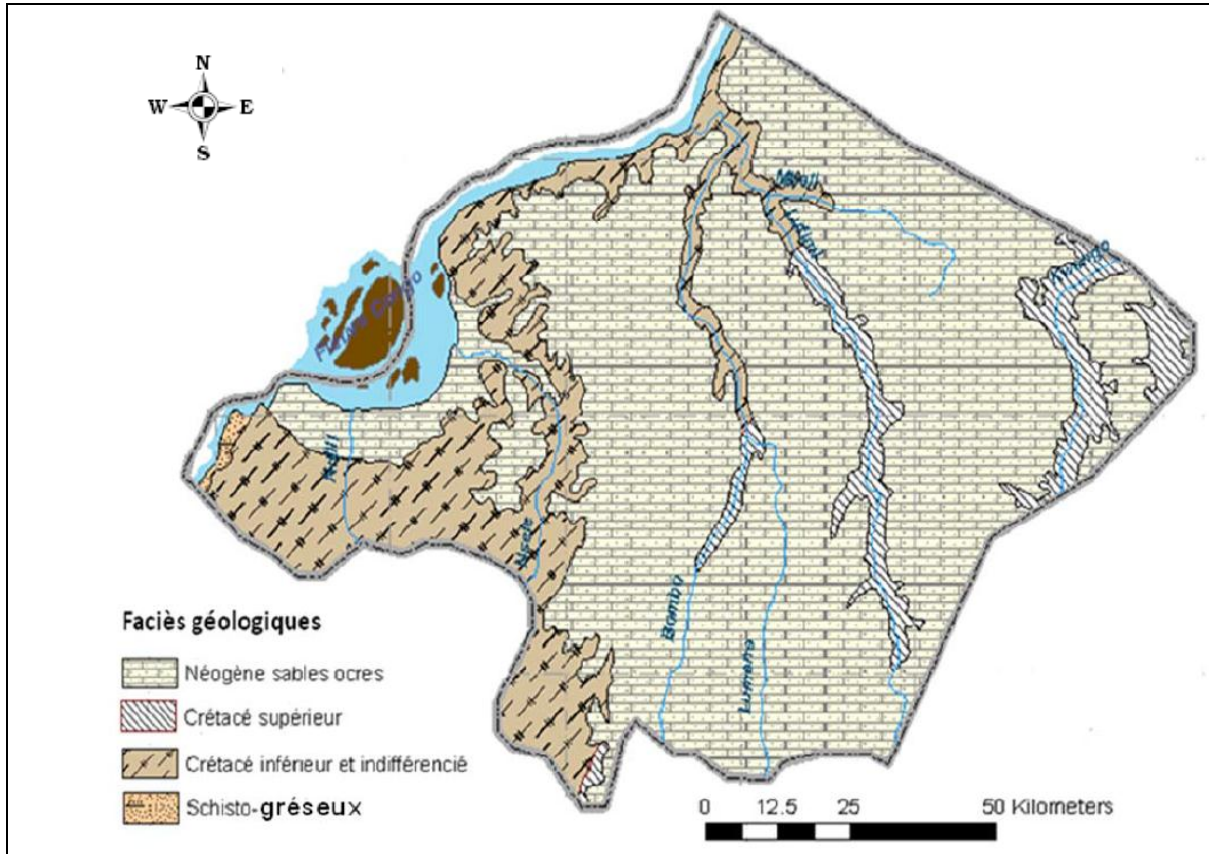


Fig. 8: Les faciès géologiques de la province de Kinshasa (EGOROFF S., 1955).

Les Formations sableuses du Quaternaire qui recouvrent le grès du Crétacé à l'ouest de la zone des collines sont absentes sur cette esquisse. De même, les grès indurés (ou grès d'Inkisi) au niveau des rivières Ndjili et Nsele, ainsi que les alluvions fluviales rencontrées au niveau de la zone de plaine n'y sont pas représentées.

Le remplissage de ce bassin sédimentaire s'est fait pendant des longues périodes marquées par des absences de sédimentation et/ou des phases d'intenses érosions car la série sédimentaire est très incomplète.

Certains passages latéraux et variations d'épaisseurs des formations géologiques de cette région méritent d'être affinés par des études plus laborieuses.

1.3.2. Données de forages d'eau et commentaires des coupes géologiques

Les études hydrogéologiques ont été menées respectivement en 1987 et en 1991 par des bureaux d'étude Aquater et OTUI sur la partie Est de la ville de Kinshasa (entre les rivières Ndjili et Nsele) dans le cadre du plan de développement du secteur « eau potable et assainissement » de la province de Kinshasa. Elles se sont appuyées sur la carte géologique du Congo, reprise sur la feuille de Léopoldville.

Sur base de ces études, la province de Kinshasa a été subdivisée en quatre grandes unités hydrogéologiques à savoir (AQUATER, 1987 ; REGIDESO, 2001):

- l'unité occidentale qui intègre aussi le centre de la ville ;
- l'unité méridionale qui englobe la zone des collines;
- l'unité centrale comprenant la partie au sud et au droit du Pool entre les rivières Ndjili et Nsele ;
- l'unité orientale correspondant au plateau des Bateke.

Sur le plan lithologique, on note que le sable de toute la plaine comporte une structure homogène. Les différences observées reposent sur la granulométrie et sur la variation des couleurs. Trois formations sableuses ont pu être distinguées : sables kaolineux, sables fins argileux et micacés de couleur blanche, situés à la base, les sables limoneux bruns ou orangés dans la partie septentrionale de la plaine et les sables dits de Lemba, qui sont grossiers, peu argileux et blanchâtres.

Epais de 5 à 10m, ces dépôts sableux surmontent une dalle de grès polymorphe. La couverture sableuse recouvre directement le grès tendre dans la partie entre Ndjili et Nsele.

D'autre part, des coupes géologiques ont été réalisées sur base des données de forages par les entreprises de forages d'eau installées à Kinshasa, en l'occurrence MIDRILCO, OXFAM/QUEBEC, TRAFOR/REGIDESO et ADIR (REGIDESO, 2001), en vue de compléter la colonne lithostratigraphique de la région (Fig.9, 10 et 11).

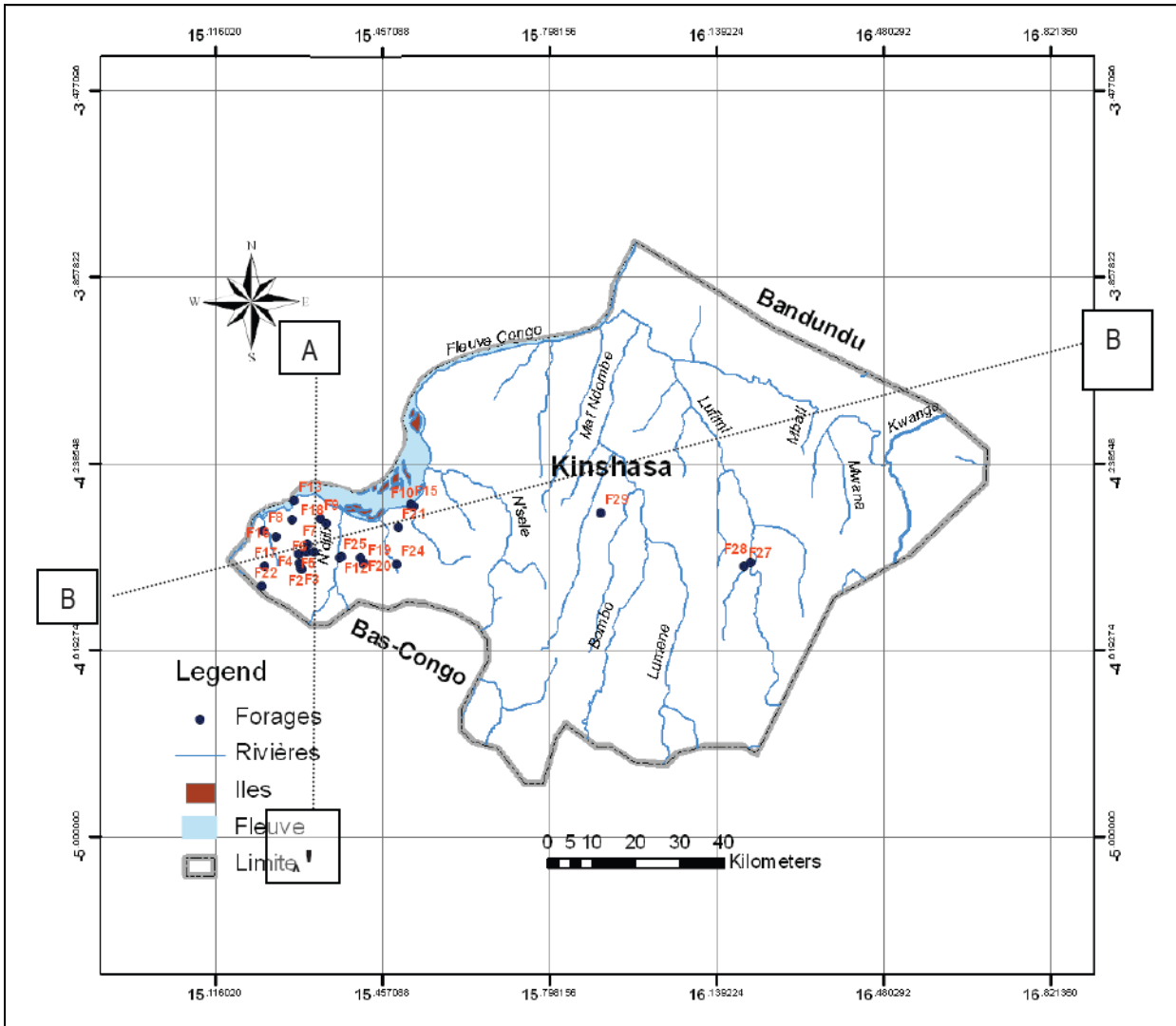


Fig. 9: Carte de localisation des forages à Kinshasa

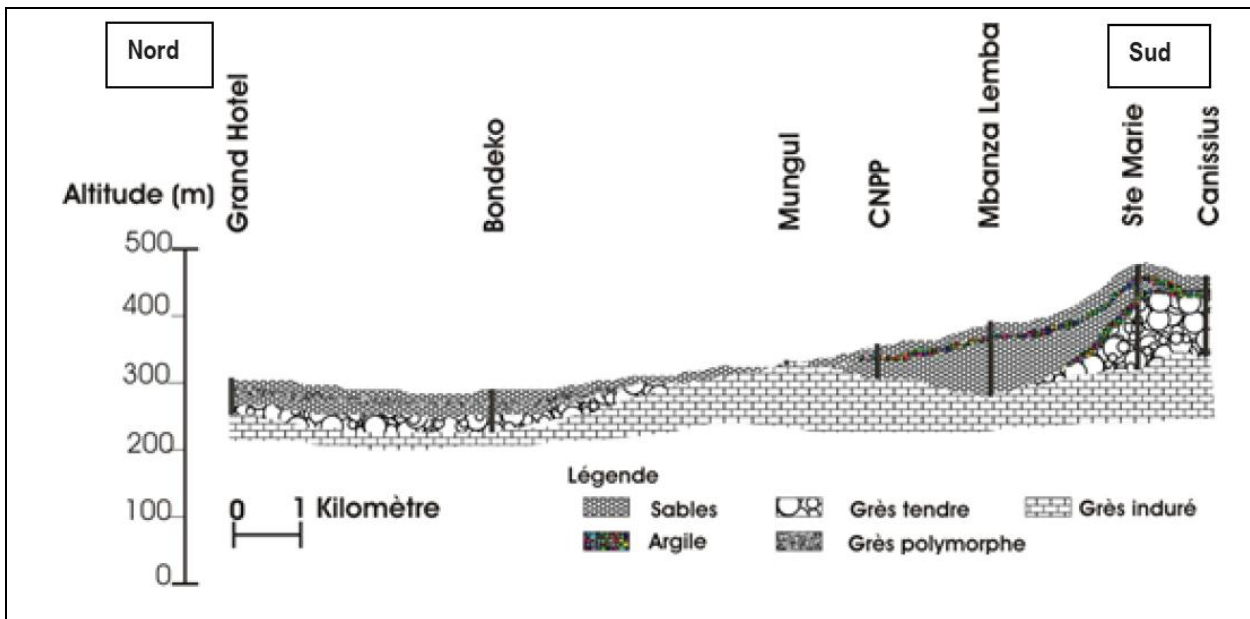


Fig. 10: Coupe géologique Nord-Sud

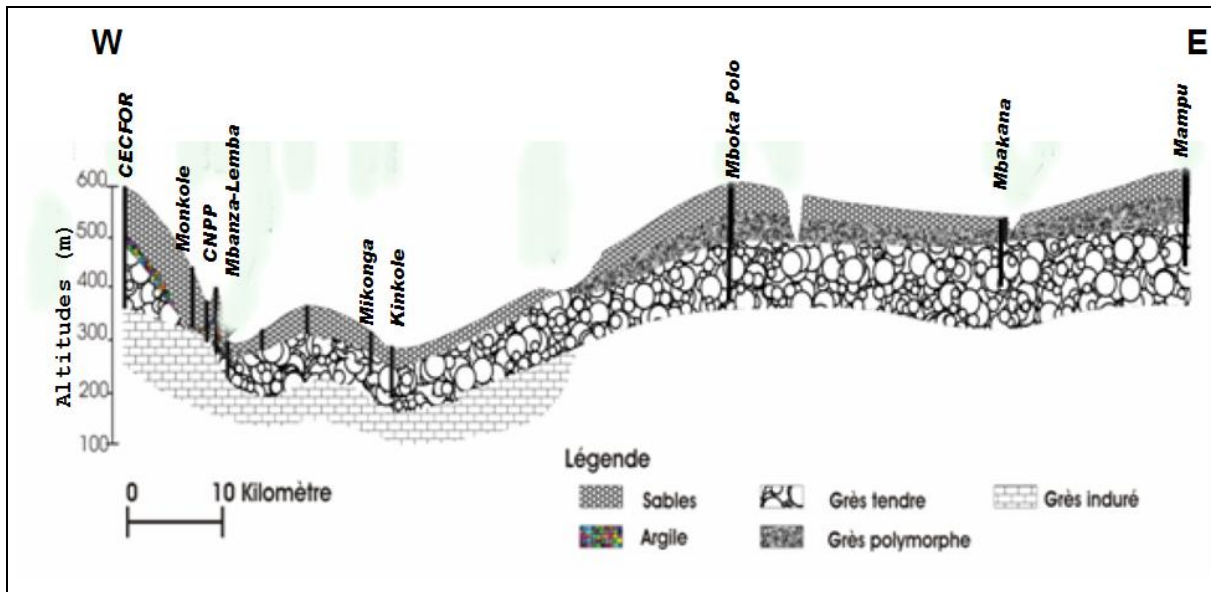


Fig. 11: Coupe géologique Ouest-Est

La coupe AA', tracé selon l'axe Nord-Sud, passe à travers la plaine pour remonter vers les zones des collines et reprend les forages ayant un ancrage dans le substratum. Ce profil montre que les grès d'Inkisi sont très proches de la surface dans la zone de plaine mais affleure entre celle-ci et les collines (zone de transition). On y observe des alluvions du fleuve avec ou sans recouvrements argileux, des débris de grès polymorphes et des grès tendres. En remontant vers les collines, les grès tendres disparaissent au niveau de la zone de transition située entre la plaine et les collines, avant de réapparaître au sud, tout en s'épaississant.

Dans la partie collinaire, les formations de recouvrement sont tendres et présentent un niveau intercalaire d'argiles qui s'étend sur toute la zone.

De direction Sud-Ouest-Nord-Est, la coupe BB' traverse la zone collinaire en passant par la partie centrale (entre les rivières Ndjili et Nsele), le plateau des Bateke pour s'arrêter à Mampu, de l'autre côté de la rivière Lufimi.

Localisé à plus de 200m de profondeur, le grès induré (grès d'Inkisi) a été identifié dans l'extrême sud-ouest jusqu'à près de 40km vers la partie centrale et est recouvert par le grès tendre épais de plus de 100m. Le sable se retrouve partout et recouvre, soit le grès tendre, soit directement le substratum qui s'incline en allant vers l'Est. Située entre le grès tendre et le sable de recouvrement, une couche argileuse discontinue a été également identifiée.

Le plateau des Bateke est recouvert d'un manteau épais de sables ocre, de 20m d'épaisseur à l'extrême ouest du plateau et de 50m, de la partie médiane vers Mampu, à l'Est. Cependant, entre les sables ocre superficiels et les grès tendres se retrouvent les grès polymorphes qui se présentent sous forme de conglomérats à

blocs siliceux occupant une épaisseur d'environ 50m, et qui constituent « l'ossature » du plateau des Bateke.

I.4. Conclusions partielles

Vaste de près de 10.000 km² et avec une population, très croissante, estimée à plus de 10 millions d'habitants, Kinshasa est la capitale et la plus grande ville de la RD Congo. A la fois ville et province, Kinshasa est structuré en 24 communes regroupées en 4 districts qui sont situés sur la partie collinaire (ville haute) et sur la plaine (ville basse). Certaines de ses communes sont urbano-rurales et comprennent plusieurs cités d'extension. Ces dernières, plus peuplées, forment plus de trois quarts de la superficie totale de la province et sont confrontées à des sérieux problèmes d'infrastructures immobilières.

Sur ce plan immobilier (logement), la ville présente un aspect esthétique très contrasté : des chics et beaux bâtiments concentrés au centre sur une faible étendue, des constructions de moyenne qualité au niveau de certains quartiers populaires indigènes planifiés ou pas et celles de très mauvais état dans d'autres cités populaires surtout dans les domaines d'extension.

Quantitativement, il sied de signaler qu'il aurait fallu construire environ 59.000 logements en 2004 pour la ville de Kinshasa. A ce jour, aucune avancée significative n'est observée.

Beaucoup de Kinois vivent donc dans conditions de promiscuité indésirable qui comptent parmi les causes du délabrement du cadre de vie en général et de la santé en particulier.

Sur le plan géologique, la province de Kinshasa est caractérisée par :

- les alluvions de basses terrasses et de fonds de vallées qui occupent l'alentour de la zone marécageuse du Pool Malebo et le fond des vallées des rivières Ndjili et Nsele ;
- les alluvions de moyenne terrasse qui constituent la zone de transition entre la plaine et la région des collines ;
- la série de sables ocre localisée à l'est sur le plateau des Bateke ;
- la série de grès polymorphes de distribution irrégulière ou discontinus dans la zone de plaine et se présentant sous forme de bancs conglomératiques épais et continus au niveau du plateau des Bateke. Ce type de grès assure une continuité hydraulique entre les sables superficiels et les grès tendres sous-jacents ;
- la série de grès du Crétacé qui recouvre la zone des collines ;

- la série de grès d'Inkisi qui affleure dans la partie sud de la ville et sur les versants des terrains couverts par les sables ocre.

Les deux dernières séries sont recouvertes de sable du Quaternaire.

A la lumière des informations disponibles, il se dégage que la connaissance géologique de la province de Kinshasa est trop faible :

- une carte géologique qui date des années cinquante et résultant, en gros, de l'interprétation des photos aériennes ; plusieurs extrapolations ont été faites pour déterminer les variations latérales ou verticales de différents faciès géologiques constitutifs ;
- des sondages de reconnaissance très localisés sur la partie centrale (plaine) de la province ; les zones collinaires et le plateau des Bateke étant demeurés peu explorés ;
- une insuffisance de travaux géologiques de terrain (coupes, géotransverses, analyses des affleurements, ...) à coupler aux images satellitaires de grande résolution sur l'ensemble de la province ;
- le manque criant des publications scientifiques sur la géologie régionale de Kinshasa.

On note quand même quelques initiatives privées mais très localisées en vue de l'amélioration de l'échelle lithostratigraphique de la région.

Aujourd'hui, il est plus que nécessaire de procéder à l'actualisation de la carte géologique de la province de Kinshasa en intégrant les données des nouvelles technologies. Cette carte constitue un outil indispensable pour une meilleure gestion environnementale et minière de cette contrée.

CHAPITRE II : LES SUBSTANCES MINÉRALES INDUSTRIELLES

II.1. Introduction

Communément appelées « minéraux industriels », les substances minérales industrielles sont des minéraux et des roches qui présentent une valeur économique et qui sont différents des minéraux métalliques, des pierres précieuses ou des combustibles. De par leurs diverses propriétés physico-chimiques intéressantes, elles peuvent être utilisées, directement ou moyennant quelques traitements, dans l'industrie après leur extraction. Ces substances englobent les matériaux de construction (argiles, sables, graviers, agrégats des roches) et les minéraux et les roches industriels au sens strict qui sont des matériaux spécifiques (kaolin, feldspath, carbonates, ...) utilisés comme matières premières principales ou adjuvants essentiels dans diverses industries (HIGHLEY D.E., 1994).

Dans ce chapitre, la classification des substances minérales industrielles est sommairement abordée. Un accent plus particulier est mis sur les minéraux argileux et les produits céramiques qui constituent le cœur de cette recherche.

II.2. Classification des substances minérales industrielles

Les ressources minérales naturelles sont généralement classées en trois catégories : les substances énergétiques, les métaux et roches métalliques, et les minéraux industriels. A cause de leurs propriétés ou de leurs utilisations, certains matériaux sont classés parmi les minerais ou les minéraux industriels. C'est le cas de la bauxite, minerai d'aluminium, qui est aussi utilisé brute comme charge dans l'élaboration des réfractaires silico-alumineux et de certains carbonates diamantifères (DUNHAM A.C., SCOTT P.W., 1994 ; MARTIN, 1994 et 2005 ; NJOYA A., 2007).

En RD Congo, les minéraux industriels sont des substances classées en carrières et utilisées comme intrants dans l'industrie légère ou lourde. Il s'agit notamment de gypse, kaolin, dolomie, calcaire à ciment, sables de verrerie, fluorine, diatomite, montmorillonite et de barytine. Les matériaux de construction à usage courant sont aussi des substances minérales classées en carrières mais utilisées dans l'industrie du bâtiment comme matériaux ordinaires non décoratifs. C'est le cas de : argiles à brique, sables, grès, calcaire à moellon, marne, quartzite, craie, gravier alluvionnaire, latérites et basaltes (RD CONGO, 2003).

En fonction de leur nature et de leur origine, la classification des substances minérales industrielles est présentée dans le tableau n°2 (DUNHAM A.C., SCOTT P.W., 1994 ; MARTIN, 1994 et 2005 ; NJOYA A., 2007).

Tableau 2: Classification des substances minérales industrielles

Origine	Type de roche ou minéral	Quelques applications industrielles	
Sédimentaire	Carbonates	Calcaires	Ciment, chaux, agroalimentaire, agriculture, raffinage, céramique
		Dolomie, Magnésite	Agriculture, céramique, produits chimiques, plastiques
	Argiles	Kaolin	Papiers, céramique, peinture
		Bentonite Smectite	Métallurgie, cosmétiques, peinture, pharmacologie, protection de l'environnement
		Vermiculite	Isolant, céramique technique
		Argile banale Argile sableuse	Céramique, construction
	Sable Gravier	Sable quartzeux	Céramique et verre, réfractaires abrasifs
		Gravier	Construction, ballastes
	Evaporites	Gypse, halite Apatite	Engrais, produits chimiques, diététiques
	Magmatique	Roches intrusives	Granite, diorite Gabbros
Syénite, syénite à néphéline			Céramique et verre, construction, décoration
Feldspaths			Céramique et verre, produits chimiques
Quartz			Céramique et verre, réfractaire abrasif, construction, filtrage
Micas			Isolant, matériaux imperméables, lubrifiants, réfractaires, décoration
Roches volcaniques		Basalte, rhyolite, trachytes	Construction, engrais
		Pouzzolane	Cimenterie, construction, engrais
		Pierre ponce, perlite, pumice	Engrais, insecticide, isolation, agrégats légers, abrasifs
Métamorphique		Gneiss	Construction, pierre de taille
	Micaschiste, micas	Construction, briques spéciales	
	Marbre	Construction, cimenterie, agriculture, céramique et verre	
	Graphite	Réfractaires, peinture, creusets	
	Talc	Cosmétiques, céramique, peinture, papier, fertilisant, lubrifiant à HT	
Gisements hydrothermaux et diagénétiques	Barytine	Produits chimiques	
	Fluorites	Métallurgie, dentifrices	
	Zéolites	Assainissement et protection de l'environnement	

Au sens plus large (du point de vue géologique), une argile est un matériau meuble pouvant correspondre à un (paléo)sol, à un matériau d'altération, à un sédiment ou encore à une roche sédimentaire contenant des minéraux argileux en grande abondance (THOREZ J., 2003).

Selon l'Association Internationale pour l'Etude des Argiles (AIPEA) et la Clay Mineral Society (CMS), l'argile désigne tout matériau naturel composé essentiellement de minéraux de tailles fines (la limite étant fixée à 2 ou 4 microns), qui passe à l'état plastique moyennant une teneur appropriée d'eau et qui durcit par séchage ou par chauffage. Les particules d'argiles sont des aluminosilicates plus ou moins hydratés dont la structure est constituée d'un empilement de feuillets. Ces minéraux argileux appartiennent en majorité au groupe des phyllosilicates. Une matière première argileuse naturelle renferme aussi des minéraux non argileux, dits accessoires, et/ou de la matière organique. Le minéralogiste définit l'argile comme un minéral ayant principalement une structure feuilletée formée par la juxtaposition des couches de silice et d'hydroxydes. Qualitativement et quantitativement, une argile peut être composée par des minéraux argileux au sens strict, des phyllosilicates réduits à une taille micrométrique, d'autres minéraux silicatés, des oxydes, des carbonates, des sulfates, des chlorures, des matériaux amorphes, de la matière organique, d'un certain contenu originel en eau d'adsorption et d'absorption (THOREZ J., 2003 ; FAGEL N., 2004 ; GUGGENHEIM S. et al., 2006 ; PIALY P., 2009).

D'une façon générale, une argile est une roche sédimentaire meuble constituée d'un ensemble de particules fines (de diamètre inférieur à 2 μm) dites minéraux argileux et de minéraux non argileux qui gagnent des propriétés plastiques en présence de l'eau pour se consolider après séchage ou frittage.

II.3. Les minéraux argileux

II.3.1. Structure cristalline

Du point de vue structural, les minéraux argileux sont constitués d'un agencement de tétraèdres siliciques (SiO_4)⁴⁻ et/ou éventuellement (AlO_4)⁵⁻, et d'octaèdres aluminiques ou magnésiques. Ces tétraèdres et ces octaèdres résultent de la superposition de trois types de plans anioniques (X, Y, Z) disposés parallèlement et contenant des anions oxygène et des groupements hydroxyles. Ils sont séparés par un espace interfoliaire (ou interfeuille) qui peut être occupé par des cations. L'ensemble feuillets-espace interfeuille forme une unité structurale et l'épaisseur de celle-ci est appelée distance basale qui est une des caractéristiques essentielles des minéraux argileux (Fig.12).

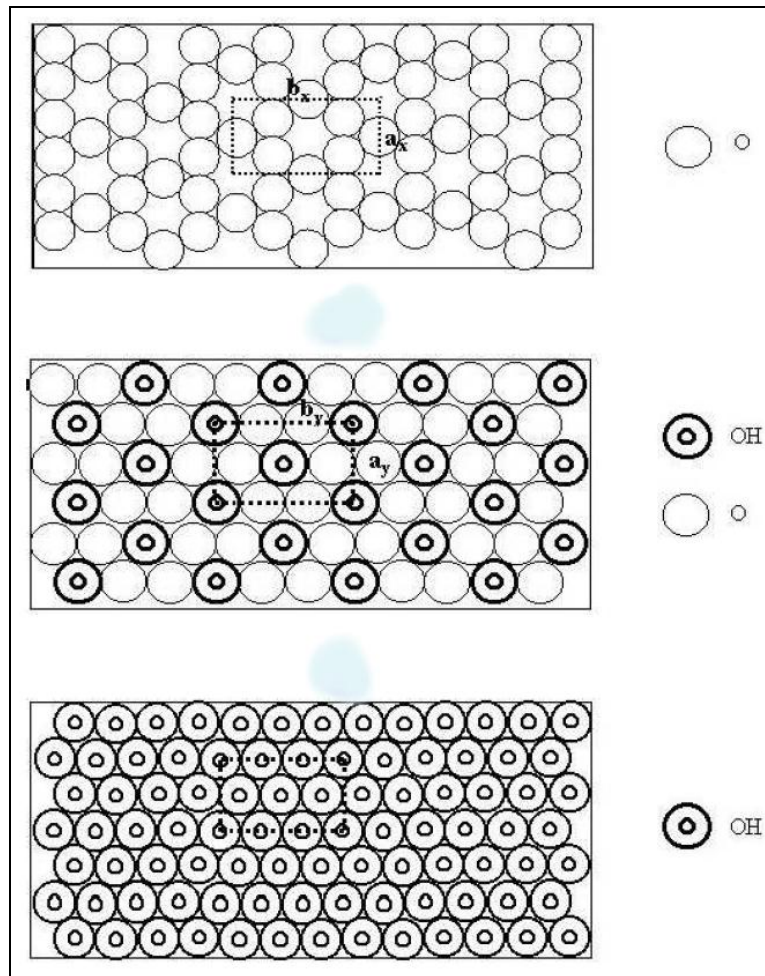


Fig. 12: Les plans anioniques X (a), Y (b) et Z(c) des minéraux argileux (PIALY P, 2009)

Dans une structure idéale, l'empilement d'un plan à lacune hexagonale X et d'un plan compact (Y ou Z) de telle sorte que l'ion OH^- du plan Y se trouve à l'aplomb de la cavité hexagonale du plan X définit des cavités tétraédriques pouvant être occupées par des cations Si^{4+} , Al^{3+} et quelques fois Fe^{3+} et Cr^{3+} . La superposition des plans Y et Z forme des cavités octaédriques où peuvent loger des cations tels que Al^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , Ni^{2+} , Mn^{2+} , etc. Lorsque l'unité structurale de cet assemblage contient six sites octaédriques occupés par des cations divalents, leur taux d'occupation est 6/6 et le minéral est dit tri-octaédrique. En revanche, si ces cations sont trivalents, leur taux d'occupation est de 4/6 et le minéral est qualifié de di-octaédrique.

Dans certains cas, la substitution de certains cations des couches tétraédriques ou octaédriques par des espèces moins chargées entraîne un déficit de charge devant être compensé par l'intercalation de cations extérieurs dans l'espace interfoliaire.

II.3.2. Classification

Les principaux critères de classification des phyllosilicates sont basés sur la combinaison des feuillets, le type de cations dans l'octaèdre, la charge de la couche et le type de matériel dans l'espace interfoliaire.

Le tableau n°3 résume, selon le nombre de couches octaédriques (O) et tétraédriques (T), les trois types principaux de minéraux argileux (CALLIERE S. et al., 1982 ; HOLTZAPFFEL T., 1985 ; FAGEL N., 2004 ; CHRITIDIS G.E., 2011).

Tableau 3: Principaux types des minéraux argileux

Type	Caractéristiques principales	Exemples types	CEC (meq/100g)	Surface spécifique (m ² /g)
1/1 (T-O)	- Une couche d'octaèdres ; - une couche de tétraèdres ; - 7,1Å d'équidistance.	Kaolinite Serpentine	1-15	10-20
2 /1 (T-O-T)	-Deux couches de tétraèdres ; - une couche d'octaèdres ; - 9,4 à 15 Å d'équidistance.	Illite Vermiculite Smectite	10-40 130-210 70-150	50-100 10-800 10-800
2/1/1 (T-O-T-O)	- Une couche d'octaèdres ; - deux couches de tétraèdres ; - un interfeuille d'octaèdres ; - 14 Å d'équidistance.	Chlorite Palygorskite Sépiolite	10-40 5-30 10-45	10-20 150-900 150-900

En plus de ces types simples, il existe des minéraux interstratifiés qui constituent des alternances régulières ou non des minéraux argileux simples différents.

II.3.2.1. Les minéraux 1/1

Les minéraux argileux de ce type sont caractérisés par (BERGAYA F. et al., 2006):

- une distance basale comprise entre 7,1 et 7,4Å ;
- un motif élémentaire formé par un empilement de trois plans anioniques : X (atomes d'oxygène, base des tétraèdres (SiO₄)⁴⁻), Y (atomes d'oxygène et hydroxyles internes) et Z (hydroxyles externes) et de deux plans cationiques (Fig.13).

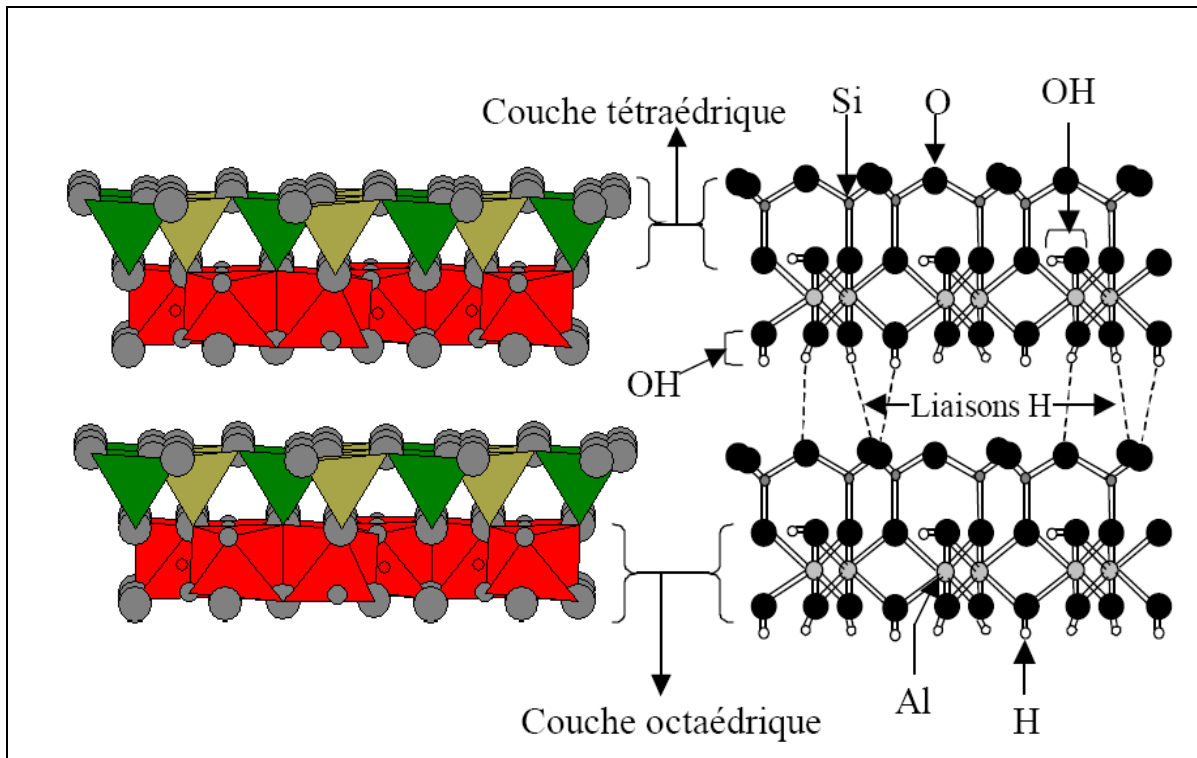


Fig. 13: Structure des minéraux 1/1 (exemple de la kaolinite) (BERGAYA F. et al., 2006)

Les liaisons Si-O ont un caractère covalent plus accentué que les liaisons Al-O dont la composante ionique est marquée. Les feuillets sont liés entre eux par des ponts d'hydrogène et des forces d'attraction de Van der Waals. Certains auteurs envisagent la possibilité d'une attraction électrostatique entre les deux surfaces basales des feuillets dont la polarité pourrait être opposée du fait de substitutions cationiques (WIECKOWSKI T., WIEWOVA A., 1976 ; ZAMMA M., 1984 ; CARTY W.M., 1999).

Parmi les minéraux 1/1, on retrouve le groupe des kaolinite-serpentine qui d'après la morphologie, l'état d'hydratation et le degré de cristallinité comprennent plusieurs minéraux dont la kaolinite et ses deux polytypes, dickite et nacrite, et l'halloysite:

- la kaolinite (formule générale : $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$) qui se présente généralement sous forme de plaquettes hexagonales parfois allongées comme de lattes ou de losanges ; l'empilement des feuillets est bien ordonné. Le diamètre de ces plaquettes peut être de quelques centimètres d'Angstrom jusqu'à une dizaine de microns. Dans les gisements résiduels et hydrothermaux, de larges « books » de kaolinite (plaquettes empilées comme des pages d'un livre) sont abondants (CHRITIDIS G.E., 2011) ;
- la dickite qui se présente aussi sous forme de plaquettes hexagonales parfois allongées dans une direction (a ou b) mais dont le diamètre peut atteindre plusieurs dizaines de micromètres et quelques micromètres d'épaisseur ;

- la nacrite ayant l'aspect de plaquettes hexagonales souvent trapues et dont le diamètre peut atteindre quelques dizaines de micromètres, voire même quelques millimètres ;
- l'halloysite qui rassemble les minéraux tubulaires à empilement complètement désordonné des feuillets. Cette morphologie particulière résulterait de l'enroulement de fines plaquettes, induite par des phénomènes de tension de surface (HOPE E.W., KITTRICK J.A., 1994). Mais il faut noter qu'à côté de cet habitus tubulaire typique de l'halloysite, des formes sphéroïdales ou discoïdales sont fréquentes et des halloysites en lattes, en plaquettes, en « chiffons » (fines plaquettes chiffonnées) ou prismatiques ont parfois été observées.

Phylliteux, les minéraux du groupe des kaolinite-serpentine sont blancs ou blanchâtres ; mais suivant la nature des impuretés qu'ils contiennent, leur couleur peut devenir rouge, grise ou bleutée.

II.3.2.2. Les minéraux 2/1

Les feuillets de ces minéraux sont formés par deux couches tétraédriques encadrant une couche octaédrique (Fig.14).

Le minéral représentatif de ce groupe est la muscovite. Ce minéral s'apparente à la phlogopite mais présente des substitutions tétraédriques : le silicium est remplacé par l'aluminium et le déficit de charge est compensé par l'introduction du potassium (K^+) dans l'espace interfoliaire (CAILLERE S. et al., 1982 ; BERGAYA F. et al., 2006).

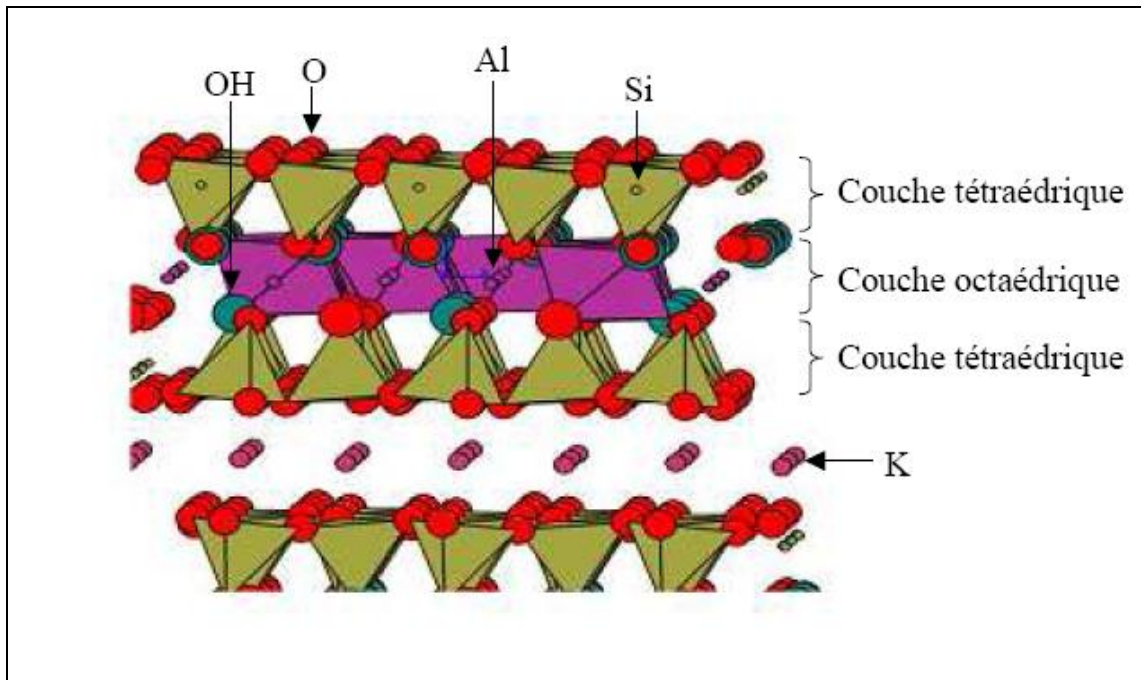


Fig. 14: Structure idéale des minéraux 2/1 (BERGAYA F. et al., 2006 ; PIALY P., 2009)

Des substitutions cationiques sont observables au sein de ces minéraux 2/1 :

- les ions Si^{4+} peuvent être remplacés par Al^{3+} et/ou Fe^{3+} dans les couches tétraédriques ;
- les ions Fe^{2+} , Mg^{2+} ou Mn^{2+} peuvent se substituer aux ions Al^{3+} dans les couches octaédriques ;
- dans les sites octaédriques, Li^+ peut aussi remplacer Fe^{2+} ou Mg^{2+} .

Ces substitutions engendrent un déficit de charge compensé par l'intercalation de cations comme Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ dans l'espace interfoliaire qui peut accueillir des quantités variables d'eau pour hydrater ces cations.

Les différentes substitutions et la teneur en espèce présente dans l'espace interfoliaire peuvent induire d'importantes modifications des propriétés ou de comportement de ces minéraux.

L'illite [formule générale : $\text{K}_x\text{Al}_2(\text{Si}_{4-x}\text{Al}_x)\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ avec $0,5 \leq x \leq 1$], phase micacée non expansible, diffère de la muscovite par une substitution moins marquée dans les couches tétraédriques et par une présence plus forte de l'eau et une teneur plus faible en cations K^+ dans l'espace interfoliaire. Ce minéral, l'illite, est un produit d'altération des feldspaths potassiques ou parfois de la muscovite sous l'effet de processus physiques et/ou chimiques impliquant l'eau de la surface de l'écorce terrestre (KONTA J., 1979 ; CARROL D. et al., 2005).

La distance basale est trop variable dans ce type de minéraux :

- de 14 à 15Å lorsque le déficit de charge du feuillet est compensé par une couche interfoliaire d'octaèdres renfermant des cations Mg^{2+} et/ou Al^{3+} hydroxylés (cas des smectites et des vermiculites);
- entre 9,1 et 9,4Å en l'absence des substitutions cationiques ;
- de 9,6 à 10,1Å lorsque les cations compensateurs ne sont pas hydratés.

Uniquement présent dans fraction fine des roches, les minéraux du groupe des smectites comprenant des cations Mg^{2+} ou Ca^{2+} contiennent deux couches d'eau dans l'interfoliaire ; les smectites ayant des cations monovalents comme le Na^+ n'en contiennent qu'une seule couche.

Les smectites sont trioctaédriques si le site Y est occupé par Al^{3+} ou plus rarement Fe^{3+} (exemples : talc, saponite, hectorite, sauconite, stevensite) ou dioctaédriques si elles renferment Mg^{2+} ou Zn^{2+} dans le site Y (exemples : montmorillonite, pyrophyllite, beidellite, nontronite).

Le groupe des vermiculites se caractérise par la présence de cations hydratés dans l'espace interfoliaire. Ces minéraux ont une charge (x) comprise entre 0,6 et 0,9, plus faible que les micas (x = 1) mais plus élevée que les smectites (x = 0,2-0,6). Le complexe interfoliaire comprend généralement des cations Mg ou Ca et deux couches de molécules d'eau.

Les vermiculites sont soit dioctaédriques (elles résultent de l'altération de l'illite ou muscovite et sont abondantes dans les sols) soit trioctaédriques et sont néoformées ou issues de l'altération des chlorites (FAGEL N., 2004).

II.3.2.3. Les minéraux 2/1/1 et les minéraux fibreux

Les chlorites sont des minéraux 2/1/1 ou T.O.T.O de formule générale : $[Si_{4-x}Al_xO_{10}Mg_3(OH)_2][Mg_{3-x}Al_x(OH)_6]$ dont les couches tétraédriques sont formées de tétraèdres SiO_4 où Si est souvent substitué par Al^{3+} , plus rarement par Fe^{3+} . Le déficit de charge qui en résulte est compensé par un excès de charge octaédrique, soit dans le feuillet T.O.T., soit dans la couche brucitique (octaèdre : $(Mg, Fe)(OH)_6$). Dans les cas des chlorites les plus communes, les octaèdres sont garnis de cations divalents ($3R^{2+}$), ce qui confère aux chlorites un caractère trioctaédrique bien que toutes les combinaisons soient possibles (tri-dioctaédrique, di-trioctaédrique, di-dioctaédrique). Les chlorites sont stables à haute température ; leur stabilité accrue par rapport aux vermiculites s'explique par la liaison forte existant entre les hydroxyles.

Les cas très particuliers de chlorites ferrifères et chlorites gonflantes ont été mis au point par diffraction des rayons X.

Les minéraux argileux fibreux se distinguent des autres par leur structure en "pseudo-feuillets ou en briques creuses". Dans ces conditions, les feuillets T.O.T. sont discontinus dans une direction parallèle à l'allongement, déterminant ainsi des rubans dont la croissance est limitée à une dimension. Ces rubans ne sont pas superposés, mais sont disposés alternativement, d'un pseudo-feuillet à l'autre. Cette structure crée des espaces vides qui sont remplis par de l'eau liée ou non (zéolithique) et par de cations échangeables (CAILLERE S. et al., 1982 ; BERGAYA F. et al., 2006).

Selon la largeur du ruban élémentaire, on distingue (Fig.15):

- la palygorskite (ou attapulgite) qui correspond à un ruban de 5 octaèdres. Leur maille cristalline monoclinique renferme 2 motifs de composition: $\text{Si}_8(\text{Mg}, \text{Al})_5\text{O}_{20}(\text{OH})_2(\text{OH H}^+)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ dans laquelle OH_2 et H_2O représentent respectivement les eaux de cristallisation et zéolithiques;
- la sépiolite, qui est constituée d'un ruban à 8 octaèdres. Sa maille cristalline est orthorhombique et comprend aussi 2 motifs de composition: $\text{Si}_{12}\text{Mg}_8\text{O}_{30}(\text{OH})_4(\text{OH H}^+)_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$.

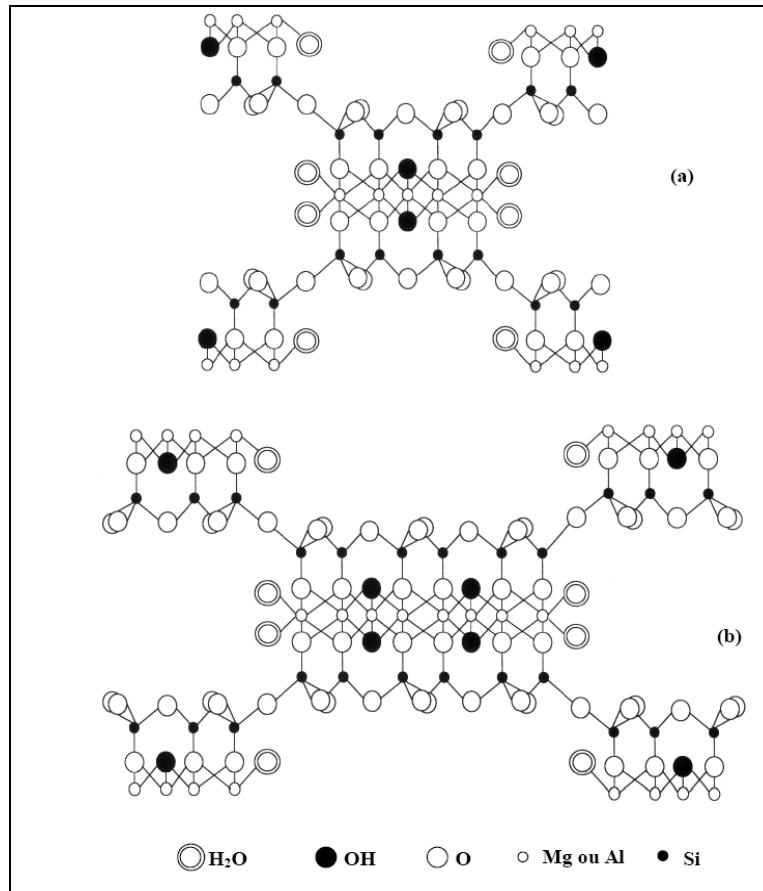


Fig. 15: Les minéraux fibreux : (a) Palygorskite; (b) Sépiolite (CAILLERE S. et al., 1982)

II.3.2.4. Les minéraux interstratifiés

Cette catégorie regroupe les minéraux argileux formés par l'empilement ou l'alternance régulière ou non de feuillets de minéraux argileux simples différents. Leur comportement aux rayons X est donc intermédiaire entre celui des différents feuillets qui le composent.

Parmi les interstratifiés réguliers, on peut citer : la corrensite (chlorite-smectite), l'allévardite et rectorite (illite-vermiculite). Sont classés parmi les interstratifiés irréguliers, les minéraux suivants : kaolinite-smectite (7 – 14s), chlorite-chlorite gonflante (14c – 14g) et vermiculite-smectite (14v – 14s).

II.3.3. Secteurs d'utilisation et valeur commerciale des argiles

A cause de leurs diverses propriétés physico-chimiques (adsorption et absorption de divers ions et molécules, adhésion, émulsion, malléabilité, résistance,...), les argiles

ont été utilisées depuis la plus haute antiquité et déjà par nos ancêtres de la préhistoire pour la fabrication des poteries rudimentaires.

De nos jours, l'utilisation des argiles connaît un nouvel essor notamment dans l'industrie :

- céramique pour la fabrication des couronnes dentaires, des porcelaines,... ;
- du bâtiment pour la fabrication des briques (maisons, hauts fourneaux, fours d'affinage et de laboratoires,...), des tuiles, des carreaux de grès cérames, ... ;
- agricole pour diluer les pesticides utilisés en agriculture lors de leur épandage ;
- pharmaceutique et en médecine pour les pansements gastro-intestinaux, les excipients ;
- papetière qui compte parmi les premières consommatrices de kaolins ;
- pétrolière pour la fabrication des boues de forage.

De nombreux travaux de recherches ont montré que les argiles possèdent aussi des propriétés catalytiques:

- catalyseurs argileux dans le cracking des produits pétroliers ;
- propriétés catalytiques de la montmorillonite dans la formation des aminoacides et leurs polymérisations en peptides ;
- essais de polymérisation du benzène en polyparaphénylène dans une montmorillonite.

Les principaux groupes de matériaux argileux et leurs applications industrielles sont résumés dans le tableau n°4 et sur la figure n°14 (JOURDAIN A., 1966 ; JOUENNE C.A., 1984 ; OLIVIER J.F., 1988 ; GONZALEZ I. et al., 1998 ; KABRE S.T. et al., 1998 ; ELTON N.J. et al., 1999 ; GARCIA SANCHEZ A. et al., 1999 ; CARRETERO I., 2002 ; MARTIN F., 1994 et 2005 ; NJOYA A., 2007).

Tableau 4: Principaux secteurs d'utilisation de minéraux argileux

Groupe	Minéral type	Principales applications
Kaolinite-serpentine	Kaolinite Halloysite	Charge minérale, revêtement et coloration des papiers, caoutchouc, céramique, pharmacologie (Fig.16)
Smectites	Montmorillonite Bentonite	Pharmacologie, catalyse chimique, composites organo-minéraux, liants des fonderies, céramique, industrie des hydrocarbures, cosmétiques (savons, pommades, champoings, crèmes)
	Talc Pyrophyllite	Céramique, fibres organo-minéraux, cosmétique, métallurgie
Minéraux fibreux	Palygorskite (attapulгите) Sépiolite	Agro-alimentaire, charge minérale, pharmacologie, fertilisant
Argiles banales « Ball clay »	Kaolinite + illite +quartz + oxydes, ...	Céramique, charge minérale, ...

Les domaines d'applications de minéraux argileux dans l'environnement sont notamment :

- le transport des polluants organiques (pesticides, herbicides) et des éléments métalliques dans les sols ;
- la conception des barrières d'étanchéité dans les décharges ;
- les problèmes de santé : fabrication de certains médicaments (médicaments à effets retardés), pansements stomacaux et intestinaux. Les argiles à foulon (substances de type argileux ou argiles non plastiques, habituellement riches en magnésie, possédant des propriétés d'absorption et/ou adsorption adéquates et formées par altération de cendres volcaniques ou par précipitation directe de la montmorillonite) sont utilisées pour fabriquer des produits pharmaceutiques absorbant les toxines, les bactéries et les alcaloïdes, traiter la dysenterie, épurer l'eau et les fluides de nettoyage à sec. Elles servent aussi de charge dans les plastiques, les peintures et les mastics ou comme support de catalyseur à base de platine.

Cependant, il sied de noter que certaines argiles fibreuses très utilisées pour leurs propriétés isolantes peuvent avoir des effets néfastes. C'est le cas du chrysolite ou amiante qui s'est révélée être une substance cancérigène.

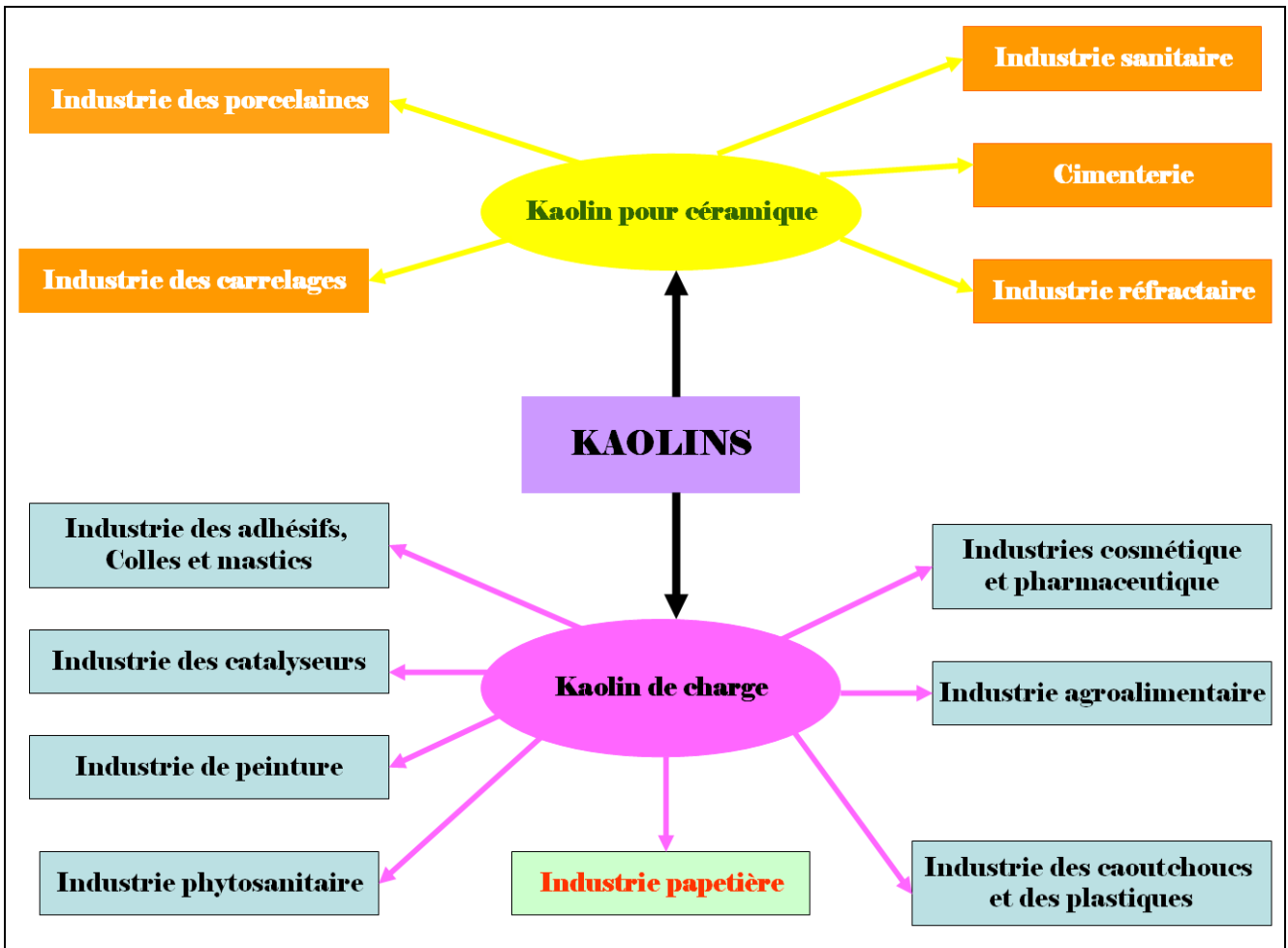


Fig. 16: Secteurs d'application du kaolin

D'après les données statistiques sur les minéraux industriels (HARBEN W.P., 1999), 75% de la production mondiale du kaolin est utilisé dans la papeterie pour le couchage des fibres cellulosiques (blancheur et qualité d'impression), 10% dans la céramique (porcelaine, industrie sanitaire, réfractaire, carrelages, synthèse des émaux,...) et 15% dans les peintures, caoutchouc, engrais, industrie pharmaceutique, etc. La quasi-totalité de ces utilisations nécessite un traitement judicieux consistant généralement en l'enrichissement des matériaux bruts en minéraux de type kaolinite ou halloysite (essentiellement concentrés dans la fraction fine) par tri granulométrique (séparation des fractions grossières comme le quartz, les micas ou l'anatase,...), magnétique (séparation des microcristaux de fer) et traitement chimique (séparation des matières organiques et autres impuretés amorphes).

Les différentes techniques d'analyses des minéraux argileux en fonction des orientations en recherches fondamentales ou appliquées sont présentées dans le tableau n°5 (THOREZ J., 2003).

Tableau 5: Techniques d'analyses des minéraux argileux

Domaines d'application		TECHNIQUES ANALYTIQUES																
		Giologie	XRD	Spectro infra rouge	Analyses thermiques	Analyses chimiques	RMN	Microscopie polarisante	Microscopie électronique	Granulométrie	Surface spécifique	Limite de plasticité	Limite de liquidité	Atterberg	Oedométrie	pH	CEC	(Micro)porosité
Recherches fondamentales	Pétrologie	+	+			+		+	+	+								+
	Paléopédogenèse	+	+			+		+	+						+			
	Sédimentologie	+	+						+									+
	Paléoclimatologie	+	+						+									
	Paléogéographie	+	+						+									
	Stratigraphie	+	+						+									
Recherches appliquées	Génie civil	+	+		+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Chimie	+	+	+	+	+		+	+		+						+	+
	Céramique	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+	+
	Géologie économique	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+					+	+
	Agriculture	+	+		+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

XRD : Diffraction des rayons X ; RMN : Résonance magnétique nucléaire ;
 pH : Potentiel d'hydrogène ; CEC : Capacité d'échange cationique

Cette liste de techniques du tableau n°5 n'est pas exhaustive. En effet, rien qu'en génie civil par exemple, d'autres techniques de caractérisation des substances argileuses existent notamment le Proctor ou le CBR.

La valeur commerciale d'une argile dépend en premier lieu de ses propriétés physico-chimiques dont la plasticité, la résistance, le retrait, l'intervalle de vitrification, la réfractarité, la couleur de la surface cuite, la porosité et la capacité d'absorption.

Les prix des argiles sont variables d'une région à l'autre et tiennent notamment compte des quantités achetées, de l'utilisation et de la teneur exacte en minéraux argileux désireux. Les prix de certains types d'argiles sont repris dans le tableau n°6 (INDUSTRIALS MINERALS, 2002 et 2007).

Tableau 6: Prix de quelques types d'argiles

Types d'argiles		Prix (en dollars par tonne)
Argiles plastiques pour céramiques	Séchées à l'air	40-105 (Angleterre)
	Affinées en boudin, en vrac	88-112
	Pulvérisées en sac	129-209
	Séchées et broyées	52-141 (Allemagne)
	Réduites en morceaux	15-61 (Allemagne)
Bentonite	Non gonflante	39,55 (Etats-Unis)
	Gonflante	45,85 (Etats-Unis)
	Importée aux Etats-Unis	115,12
	Exportée des Etats-Unis	121,33
Kaolin	Toute qualité	118,73
	Traité par flottation	55,64
	Qualité pigment (calciné à basse température)	319,61
	Non traité	9,57
	Matière de charge	80-100 (à l'usine de Géorgie)
	Matière de revêtement	85-185
	Appareils sanitaires	65-75
	Vaisselle	125
	Matière de charge (calciné en vrac)	320-375
Argiles réfractaires	-	23,54 (en moyenne)
	Importées aux Etats-Unis	532,11
	Exportées des Etats-Unis	90,84
Argiles à foulon	Attapulгите	122,94
	Montmorillonite	87,25
	importées des Etats-Unis	234,15
	Exportées des Etats-Unis	144,50
	Granulaires dont 40 à 100% des particules ont une granulométrie inférieure à 325 mesh	220-551
	Granulaires, de granulométrie comprise entre 6 et 30 mesh	358-772
	Granulaires, de granulométrie inférieure à l'intervalle de 4 à 8 mesh	193-551
	Expédiées d'Asie	158-315

II.4. Les produits céramiques

II.4.1. Matières premières : Extraction et exigences technologiques

II.4.1.1. Matières premières

Le terme céramique est dérivé du mot « keramos » qui signifie « terre cuite » et s'emploie pour désigner les matières utilisées dans l'industrie de la poterie. Ces dernières sont inorganiques (éventuellement avec une certaine teneur en substances organiques), constituées des composés non métalliques et ayant subi un procédé de cuisson qui leur confère des propriétés définitives. Outre les matières à base d'argile, les céramiques actuelles comprennent une multitude de produits dont la teneur en argiles est très faible, voire nulle. Une céramique peut être émaillée ou non émaillée, poreuse ou vitrifiée.

Traditionnellement, les différents secteurs de la céramique se classent en deux groupes : le groupe de la céramique « grossière » ou « de construction » qui comprend les secteurs des briques et tuiles, des tuyaux en grès, des produits réfractaires et des granulats d'argile expansée et le groupe de la « céramique fine » ou de la « céramique traditionnelle et industrielle », qui regroupe les secteurs des carreaux pour sols et murs, des céramiques ornementales, des appareils sanitaires, des céramiques techniques et des abrasifs inorganiques.

Mais, le terme « terres cuites » est de plus en plus utilisé pour désigner les briques et les tuiles à base d'argiles et lesquelles servent de matériaux dans de nombreuses branches du bâtiment et de la construction. Le plus souvent, les briques et les tuiles ont une appellation qui désigne non pas la technique de façonnage utilisée, mais l'usage auquel elles sont destinées : briques de parement, de pavage, (pleines, perforées ou creuses) ou de cheminées et des tuiles extrudées ou pressées.

Le tableau n°7 donne la synthèse de différentes substances entrant dans la fabrication des produits céramiques (CERATEC, 1987 ; GALTIER L. et al., 1992 ; BAÏLON J.P., DORLOT J.M., 2000).

Tableau 7: Les produits céramiques et leurs matières premières

Produits céramiques	Matières premières naturelles	Autres matières
Terre cuite (Briques et tuiles)	Argiles (illites-kaolinites) Sables argileux Latérites	Dégraissants (sables, feldspaths, chamottes, laitiers granulés de hauts fourneaux) Ajouts spéciaux (plastifiants : carbonate de sodium ; flocculants : chaux, ciment ; colorants : oxyde de fer, bioxydes de manganèse et de titane, ...)
Produits réfractaires (Briques d'argiles réfractaires, briques de silice, briques de magnésie et d'alumine)	Argiles pures (kaolinite) Produits silico-alumineux Matières riches en alumine : bauxites, trimorphes de néosilicates (disthène, sillimanite et andalousite) Quartzite, dolomite, magnésie, chromite, forstérite, graphite, zircon.	Chamottes, corindon fritté, carbure de silicium, mullite, fondue ou spinelle, chaux fondue, oxyde de zirconium.
Tuyaux en grès	Argiles	Chamottes, émail (craie dolomie, quartz, oxydes métalliques)
Carreaux pour sols et murs	Argiles et kaolins Feldspaths, quartz, carbonates (calcite, dolomite) et talc	Chamottes
Céramiques ornementales ou céramiques domestiques	Argiles plastiques Feldspaths et quartz	
Appareils sanitaires	Kaolins et argiles Feldspaths, quartz et calcite	
Céramiques techniques (isolants, condensateurs, filtres, produits biomédicaux,...)	Kaolins, pas ou peu d'argiles Feldspaths et quartz	Oxydes, carbures (SiC), nitrures, borures et divers ions métalliques
Abrasifs inorganiques	Corindon, diamant Feldspaths, quartz, néphéline Kaolins et argiles	Alumines spéciales fondues, carbure de silicium noir et vert (CBN), nitrure de bore
Granulat d'argile expansée	Argiles Feldspaths, quartz et carbonates	Auxiliaires de dilatation (huiles lourdes, coke, ...), agents de démoulage (dolomite, composés de chaux) et fondants.

Les céramiques traditionnelles ou silicatées (Tabl.8) sont des produits obtenus à partir de mélanges constitués de matières minérales pulvérulentes à base d'argiles et/ou de la chamotte. Les argiles les plus utilisées dans la fabrication de ces produits céramiques (Tabl.9) sont généralement regroupées en quatre types qui sont (GALTIER L. et al., 1992 ; ELFIL H. et al., 1995 ; BAÏLON J.P., DORLOT J.M., 2000 ; PIALY P., 2009) :

- les argiles grésantes (exemple illito-kaolinitique) ;
- les argiles pour produits blancs (exemple la kaolinite, avec teneur en Fe_2O_3 inférieure à 1%) ;
- les argiles réfractaires (exemple la kaolinite : Al_2O_3 supérieure à 25%) ;
- les argiles pour terre cuite et faïence (kaolinite, illite, et autres : $TiO_2 + Fe_2O_3$ supérieure à 3%).

Tableau 8: Caractéristiques et utilisation des céramiques traditionnelles

Type	Caractéristiques générales	Exemples d'utilisation
Terres cuites	Porosité : 15-30% ; émaillées ou non ; opaque et colorées.	Briques, tuiles, conduits de fumées, tuyaux de drainage, revêtement de sols et de murs, poteries culinaires et ornementales.
Faïences	Porosité : 10-15% ; surface émaillée ; opaque et peu colorée.	Equipements sanitaires, vaisselles, carrelage (mur et sol), pièces de décoration.
Grès	Porosité : 0,5-3% ; surface vitrifiée ; blanchâtres ou colorés ; grains fins à grossier ; opaque.	Carreaux de sols, tuyaux, appareils de chimie et équipements sanitaires.
Porcelaines	Porosité : 0-2% ; surface vitrifiée ou non ; translucides et blanches.	Vaisselle, appareils de chimie et isolateurs électriques.
Vitreous	Peu poreuses et non Translucides	Vaisselle, articles culinaires et sanitaires.

Tableau 9: Les céramiques silicatées

Produits	Kaolin (%)	Argile réfractaire (%)	Argile kaolinitique blanche (%)	Argile kaolino-illitique (%)	Argile à grès et poterie (%)	Chamotte (%)
Réfractaires		50-90				10-50
Porcelaines	30-50					
Carreaux				40-80		
Sanitaires				10-30	10-30	20-50
Vitreous	15-25		20-30			
Faïences	0-25			20-60		
Poterie				0-25	20-60	0-50

Cette composition de l'argile pour l'obtention des céramiques domestiques peut nécessiter l'ajout d'une certaine quantité de substances (Tabl.10) comme le quartz, le feldspath, la néphéline, la syénite, le calcaire et le talc (CERAME-UNIE, 2003).

Tableau 10: Composition chimique type pour la fabrication des céramiques domestiques

Minéral (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Autres
Kaolin	55	35	10
Ball clay	75	20	5
Feldspath	70	20	10
Syénite néphélinique	60	25	15
Talc	60	0	40 (MgO)
Silice	95	0	5
Silex	90	0	10
Cendre d'os	0	0	100 Ca ₅ (PO ₄) ₃ OH)

II.4.1.2.Extraction des matières premières argileuses

La plupart des argiles utilisées pour la fabrication des briques et tuiles sont d'origine sédimentaire et ont été déposées sous des milieux sédimentaires très divers : sous-marins, alluviaux, fluviaux ou fluvio-glaciaires. Ces milieux sédimentaires variés influent sur la qualité minéralogique et sur la composition chimique des argiles. Concernant le cas particulier du kaolin, les gisements sont classés en deux catégories selon leur genèse (MURRAY H.H., et al., 1978 ; NJOYA A., 2007):

- les gisements primaires qui peuvent être résiduels ou hydrothermaux. Les kaolins primaires sont formés par altération in situ ou hydrothermale des roches (granites, gneiss, syénites, cendres volcaniques) riches en minéraux silico-alumineux (feldspaths, micas) dans un environnement chaud et humide. Les gisements de ce type sont importants le long des zones de fracture et de broyage qui favorisent la pénétration des eaux météoriques dans de grandes profondeurs de la roche mère ;
- les kaolins secondaires ou sédimentaires sont ceux formés ailleurs, puis transportés et déposés dans un bassin sédimentaire donné et y subissent des processus diagénétiques. Ce type de kaolin peut aussi résulter de l'altération des clastes de feldspaths dans les sables et grès arkosiques (MITCHELL D., VINCENT A., 1997). D'autres kaolins sédimentaires sont formés par dissolution des carbonates dans les calcaires argileux, marnes et dolomies, laissant un résidu constitué essentiellement d'argiles (MURRAY H.H., KELLER W.D., 1993).

L'exploitation de matériaux argileux se fait le plus souvent à ciel ouvert ; les forts tonnages de terre employés nécessitent l'installation de l'usine, dans la mesure du possible, à proximité de la carrière ou de la mine. L'extraction suit généralement le processus suivant :

- découverte au bulldozer, à la pelle chargeuse mécanique et même à la décapeuse ;
- extraction des matériaux argileux à l'aide d'une pelle mécanique de l'excavateur à godets, au marteau piqueur ou en utilisant des explosifs quand l'argile est trop dure ;
- transport des matériaux à l'usine suivant la distance et la topographie des lieux grâce aux wagonnets, camions ou bandes transporteuses.

II.4.1.3. Exigences technologiques

Bien que des normes d'utilisation des argiles dans les divers secteurs de la céramique existent et peuvent varier d'un pays à un autre, les exigences technologiques reposent souvent sur la granulométrie, la composition chimique et/ou minéralogique.

II.4.1.3.1. Granulométrie

L'étude granulométrique d'un matériau naturel, terre ou sol, devant servir dans le secteur de la céramique est d'une importance capitale car c'est d'elle que dépendent grandement les caractéristiques des produits finis qui en dérivent. La composition granulométrique des argiles intervient donc pour une part importante sur leurs aptitudes au façonnage, au séchage et à la cuisson.

En effet, la terre (ou un sol donné) est constituée, généralement, par des mélanges en proportions variables de quatre fractions : graviers, sables, limons et argiles (CERATEC, 1987 et 1997 ; CRATERE, 1991 et 1995).

Les graviers sont constitués de morceaux de roches plus ou moins durs, dont la grosseur varie de 2 à 20mm. Ils forment un constituant stable et leurs propriétés mécaniques ne subissent que peu ou pas de modifications sensibles en présence de l'eau.

Formés de grains minéraux de taille variant entre 0,060 et 2mm, les sables sont des constituants stables qui ne possèdent une cohésion apparente qu'à l'état humide.

Secs, les limons, fractions constituées de grains compris entre 0,002 et 0,060 mm, ne possèdent presque pas de cohésion ; mais humides, ils présentent une bonne cohésion.

Ces trois fractions se caractérisent par leur stabilité en présence de l'eau. Secs, ils ne présentent pas de cohésion suffisante et de ce fait, ne peuvent être utilisés seuls comme matériaux. Une adjonction d'argile s'avère donc nécessaire.

Les argiles, qui composent la fraction la plus fine des sols (moins de deux microns) ne possèdent pas les mêmes caractéristiques que les trois autres fractions énumérées ci-dessus. Chaque particule d'argile est entourée par un film d'eau absorbée très fortement. Ceci donne à l'argile sa cohésion et l'essentiel de sa

résistance mécanique. L'argile confère donc aux produits finis sa cohésion et agit comme liant entre les éléments plus grossiers qui constituent le squelette.

Le tableau n°11 présente la composition granulométrique idéale de la terre et les limites recommandées pour une stabilisation adéquate et une obtention des produits finis de qualité acceptable (NJOPWOUO D., 1985 ; CERATEC, 1987 et 1997 ; CRATERE, 1991 et 1995 ; CDI-CRATERE, 1996 ; FERD. LIETTI S.A., 2004 ; YAKOUBI N. et al., 2006 ; GUERRAOUI F. et al., 2008).

Tableau 11: Seuils granulométriques optimaux des matériaux en céramique

Produits finis	Fractions granulométriques	Stabilisants (principaux)
Briques crues stabilisées	15% argile et limon 30% sable fin 30% sable grossier 25% gravier fin	Ciment (4-6% ou 8%)
	35% argile 25% sable fin 25% sable grossier 15% gravier fin	Chaux (5-8% ou 12%)
Briques cuites	40% argile	-
Tuiles	40% argile ou 70% sable (0,2-0,5mm)	-
Céramique fine	Diamètre (d) <50µm	-

Une quantité d'au moins 40% en argile peut suffire pour produire des briques cuites et/ou de tuiles de très bonne qualité. Mais en ce qui concerne les briques stabilisées, il y a lieu de noter les faits ci-après :

- le ciment utilisé pour la stabilisation réagit surtout avec le sable pour former une structure rigide et résistante. Les particules d'argiles et/ou de limons ne contribuent pas à la constitution de cette structure solide mais 10 à 15% de ces particules sont nécessaires pour obtenir la plasticité et la cohésion suffisante durant le façonnage. La granulométrie doit être continue afin

d'obtenir des blocs de haute densité et minimiser la proportion de stabilisant pour une résistance donnée. La plus grande efficacité du dosage est obtenue dans la matière première de type latéritique avec des teneurs en eau optimale de 9-17% (1760-2400 kg/m³) ;

- la chaux utilisée pour la stabilisation réagit avec les particules de sables mais également avec les particules d'argiles pour former une structure solide moins rigide. Un produit de bonne qualité est donc obtenu à partir d'une terre contenant un pourcentage de particules argileuses plus élevé que dans le cas de la stabilisation au ciment.

II.4.1.3.2. Composition chimique et minéralogique

Les limites admissibles d'utilisation des matières premières argileuses en céramique sont données dans le tableau n°12 (JOURDAIN A., 1966 ; JOUENNE C.A., 1984 ; ENOBELINDA S.M., OSSAH N.H., 1993 ; MURRAY H.H. et al., 1993 ; ELFIL H. et al., 1995 ; MAMBA MPELE, 1997 ; MURRAY H.H., 2000 ; NKOUMBOU C. et al., 2001 ; MINERA SABATER, 2003 ; FERD LIETTI S.A., 2004 ; EL YAKOUBI N. et al., 2006).

Tableau 12: Limites admissibles d'utilisation des argiles en céramique

Nature des éléments	Formulation	Tolérances (%)	Effets sur produits finis
Silice	SiO ₂	35 – 85	Réfractarité, contraction de la masse,...
Alumine	Al ₂ O ₃	9 – 45	Réfractarité, résistance mécanique, couleur blanche
Magnésie	MgO	0 – 5	Porosité
Chaux	CaO	0 – 25	Porosité
Oxyde de manganèse	MnO	?	Couleur noire
Sesquioxyde de fer	Fe ₂ O ₃	0 – 9	Couleur rougeâtre ; fondant
Oxyde de titane	TiO ₂	0,3 – 2	Couleur jaune
Oxydes alcalins	Na ₂ O + K ₂ O	1 – 5	Fondants
Gaz carbonique	CO ₂	0 – 13	Volume
Anhydride sulfurique	SO ₃	0 – 3	Volume/Toxicité
Eau de combinaison	H ₂ O	5 – 11	Volume/Poids

Les éléments nuisibles à éviter dans la matière première, surtout si celle-ci est destinée à la production des matériaux de construction du genre briques et tuiles, sont notamment:

- la craie en gros grains qui se transforme au cours de la cuisson en chaux vive ; ces nodules font éclater le produit en présence de l'humidité. Mais il faut noter que la chaux entraîne la plupart du temps les colorations claires, confère un bon palier de cuisson mais une fusion brutale, augmente la porosité des produits ;

- les pyrites présentent le même effet que les nodules de chaux ; des teneurs en soufre sont nuisibles car cet élément est susceptible d'être évacué dans les fumées lors de la cuisson (problème environnemental);
- les sels solubles (sulfates,...), cristallisent en surface, diminuent de volume à la cuisson et s'hydratent sous la pluie faisant éclater la masse (problèmes d'efflorescence);
- les impuretés organiques (racines, débris végétaux et matières organiques) qui brûlent à la cuisson laissant des vides dans la masse d'où produits poreux. La présence des matières organiques affecte aussi le durcissement du ciment et de la chaux pendant la stabilisation. Mais, les matières organiques sont quelquefois très utiles : amélioration de l'aptitude au façonnage, amélioration de l'aptitude à l'expansion pour la fabrication d'argile expansée ;
- les pierrailles en gros grains éclatent à la cuisson ;
- une quantité de sodium ou de potassium supérieure à 2% empêche la stabilisation et une terre ayant un pH >10 ou pH<4,5 est à éviter.

Dans l'industrie de la brique et de la tuile, la composition minéralogique et chimique des argiles diffère considérablement entre les différents pays. Le tableau n°13 en est une belle illustration au sein des pays européens (CERAME-UNIE, 2003).

Tableau 13: Composition minéralogique des argiles utilisées dans les briqueteries européennes

Pays	Quartz	Feldspath	Calcite	Pyrite	Kaolinite	Illite	Montmorillonite	Vermiculite
Autriche	21-49	5-15	2-26	<2	3-10	25-60	2-25	-
France	0-70	rare	0-30	-	faible	dominante	Faible	-
Hollande	40-71	1-12	-	0-2,8	5-22	7-20	3-30	7-20
Hongrie	16-32	3-14	0-14	0-2	2-13	4-21	3-18	2-4
Italie	16-54	1-24	1-41	-	1-26	5-42	2-34	-
Danemark	35-50	10-20	1-25	-	5-15	10-20	5-20	-
Belgique	34-65	10-15	0-8	0-2	1-5	3-15	5-43	-
Angleterre	10-55	0-25	0-17	0-7	0-40	0-40	0-10	0-15
Suisse	13-55	1-33	1-37	0-0,7	5-26	2-40	-	2-16
Allemagne	15-60	1-25	1-25	0-2	3-40	10-50	10-50	-
Gamme pour les dix pays	0-71	0-33	0-41	0-7	0-40	0-60	0-50	0-20

Les produits réfractaires quant eux sont subdivisés en trois grands types : acides (à base de la silice), neutres ou spéciaux (à base de graphite, carbures, zircon) et basiques (proviennent de : magnésie, chromite, magnésie-chrome, forstérite, dolomite, alumine ou chaux). Le tableau n°14 présente la classification des produits réfractaires selon la teneur du constituant principal (JOURDAIN A., 1966 ; JOUENNE C.A, 1984).

Tableau 14: Terminologie des produits réfractaires

Terminologie	Teneurs limites du constituant principal
Produits à haute teneur en alumine (Groupe 1)	$Al_2O_3 \geq 56\%$
Produits à haute teneur en alumine (Groupe 2)	$45\% \leq Al_2O_3 < 56\%$
Produits argileux	$30\% \leq Al_2O_3 < 45\%$
Produits silico-argileux	$10\% \leq Al_2O_3 < 30\%$ et $SiO_2 < 85\%$
Produits siliceux	$85\% \leq SiO_2 < 93\%$
Produits de silice	$SiO_2 \geq 93\%$

Avec leurs températures de fusion correspondantes, les substances les plus couramment utilisées pour les opérations de fonte ou de coulage des produits réfractaires sont données dans le tableau n°15 (CERAME-UNIE, 2003).

Tableau 15: Les substances utilisées dans la fonte des produits réfractaires

Nom	Formule	Température de fusion (°C)
Alumine	Al_2O_3	2050
Chrome III	Cr_2O_3	2275
Magnésie	MgO	2830
Dolomite	$\text{CaO} + \text{MgO}$	2700
Silice	SiO_2	1725
Zircone	ZrO_2	2700
Zirconium	ZrSiO_4	1770

Céramiques capables de résister à des températures supérieures à 1500°C, les produits réfractaires se présentent sous des formes et des aspects extrêmement variés et s'utilisent dans un grand nombre d'applications industrielles : acier, ciment, cuivre, pétrochimie, céramique, verre, incinérateurs, générateurs et systèmes de chauffage domestique, etc. Ils sont indispensables aux procédés à haute température et résistent à tous types de contraintes (mécaniques, thermiques, chimiques) tels que l'érosion, la déformation par fluage, la corrosion et les chocs thermiques.

La résistance des éléments réfractaires aux températures élevées est définie de telle sorte que leur point de ramollissement ne soit pas inférieur à 1500°C. On emploie aussi une classification qui distingue les produits réfractaires, dont le point de ramollissement est entre 1500 et 1800 °C, des produits hautement réfractaires, dont le point de ramollissement est supérieur à 1800 °C (CERAME-UNIE, 2005).

Les tableaux n°16 et 17 donnent quelques exemples des gammes (minimum-maximum) de composition minéralogique et chimique des argiles utilisées en Europe dans la fabrication des tuyaux en grès (CERAME-UNIE, 2003).

Tableau 16: Composition minéralogique des argiles en fabrication des tuyaux en grès

Minéral (% en poids)	Belgique	Danemark	Italie	Ukraine
Quartz	24-45	8-25	35-50	21-33
Feldspath	11-18	1-4	1-24	0-0
Kaolinite	24-32	30-60	5-20	8-20
Illite	16-37	10-40	12-30	40-56
Montmorillonite	0-8	2-10	0,5-1	0-0

Tableau 17: Composition chimique des argiles en fabrication des tuyaux en grès

Élément (% en poids)	Belgique	Danemark	Italie	Ukraine
S	0,02-0,05	0,0-0,2	0,01-0,62	0,01-0,10
F	0,03-0,05	0,02-0,06	0,04-0,13	0,02-0,05
CO ₂	0,1-0,3			0,50-1,50
SiO ₂	60-81	55-70	60-75	55-63
Al ₂ O ₃	15-27	20-35	15-23	17-22
Fe ₂ O ₃	1,0-7,4	1,0-10	5-7	6-8
MgO	0,2-1,0	0,0-1,5	0,7-1,5	1,7-2,2
CaO		0,0-0,8		0,3-0,6
Na ₂ O	0,1-0,3	0,0-0,4	3-7	0,3-1,1
K ₂ O	1,0-2,6	1,0-4,0	1-3	2,8-3,9
TiO ₂	1,3-1,8	1,0-2,5	0,5-1,0	0,9-1,0

Les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques recherchées dans les argiles devant servir à la production des granulats d'argile expansée sont notamment (CERATEC, 1987 et 1997 ; CERAME-UNIE, 2005):

- une plasticité relativement élevée, avec une haute teneur en fines ;
- une teneur relativement élevée en silicates stratifiés (illite ou micas) et supérieure à 40% est avantageuse ; la teneur en kaolinite devrait être généralement faible ;

- la teneur en calcite ou en dolomite réduit le temps de dilatation ; la chaux en morceaux est nuisible car elle peut provoquer par la suite un écaillage ;
- composition chimique : Al_2O_3 (12-25%), SiO_2 (47-78%), fondants (Na_2O , K_2O , CaO , Fe_2O_3 : 8-29%), carbone organique (0-2,5%), FeS_2 doit être en grains fins (résidus dans le produit fini $\leq 1,0$ ou 1,5% SO_3) ;
- composition minéralogique : quartz (7-45%), carbonates (0,1-17%), minéraux argileux (40-80%), feldspath (5-25%) et autres (3-17%) ;
- un ramollissement pyroplastique de la masse ou des granulés doit se produire au cours de l'étape la plus propice de la formation gazeuse ; cela permet d'avoir la plage de dilatation la plus avantageuse, d'au moins 50 à 100 K.

II.4.1.3.3. Plasticité

Dans le domaine de la céramique, la plasticité est une des propriétés recherchées car elle facilite la fabrication (surtout le façonnage) des produits céramiques dont elle assure la cohésion en crue.

C'est une des mesures conventionnelles communément appelées limites d'Atterberg qui expriment les différences de comportement mécanique des sols, différences essentiellement liées aux variations de la teneur en eau. Susceptibles de fournir des indications sur la facilité plus au moins grande de travail de sol (indicateur quantifiant la plasticité d'un sol), ces limites ont été mises au point par l'Agronome Suédois ATTERBERG en 1911 (HOLTZ R.D., KOVACS W.D., 1991 ; CALLAUD M.J., 2004).

II.4.1.3.3.1. Limites de liquidité (W_L) et de plasticité (W_P)

Elles correspondent aux seuils de passage d'un matériau de l'état solide à l'état plastique (W_P) et de l'état plastique à l'état liquide (W_L).

La limite de plasticité représente donc la teneur en eau d'un sol qui a perdu sa plasticité et se fissure en se déformant lorsqu'il est soumis à des faibles charges

II.4.1.3.3.2. Limite de retrait (W_S)

La limite de retrait est la teneur en eau à partir de laquelle, lorsqu'un sol est séché, son volume ne diminue plus. Cette limite peut être estimée à partir de la relation suivante :

$$W_S = 5,4 - 0,27W_L + W_P$$

II.4.1.3.3. Indices de plasticité (I_p) et de consistance (I_c)

L'intervalle entre les limites de liquidité et de plasticité définit l'étendue du domaine de la plasticité qui s'exprime par la relation :

$$I_p = W_L - W_p$$

Le tableau n°18 présente l'estimation de la plasticité d'un sol selon les valeurs de l'indice de plasticité.

Tableau 18: Estimation de la plasticité d'un sol

I_p	Degré de plasticité
0 – 5	Non plastique
5 – 15	Peu plastique
15 – 40	Plastique
> 40	Très plastique

On conçoit donc qu'un sol ayant un grand indice de plasticité est très sensible aux conditions atmosphériques, car plus I_p est grand plus le gonflement par humidification de la terre et son retrait par dessiccation seront importants. Enfin, cet indice précise aussi les risques de la déformation du matériau et donne une indication sur sa compressibilité.

Dans le domaine de la céramique, la plasticité est une des propriétés recherchées car elle facilite la fabrication des produits céramiques dont elle assure la cohésion en crue.

La comparaison de la teneur en eau naturelle W d'un sol et les limites d'Atterberg permet de se faire une idée de l'état d'un matériau qu'on peut caractériser par son indice de consistance I_c . Cet indice est calculé par la relation suivante (COSTET J., SANGLERAT G., 1981 ; CALLAUD M.J., 2004) :

$$I_c = (W_L - W) / (W_L - W_p) = (W_L - W) / I_p$$

Le tableau n°19 présente l'état d'un sol en fonction de sa consistance et des limites de plasticité et de liquidité.

Tableau 19: Etat du sol en fonction de la consistance

Indice de consistance	Etat du sol
$I_c > 1 ; W < W_p$	Solide (très consistant) ou Semi-solide
$0 < I_c < 1 ; W_p < W < W_L$	Plastique
$I_c < 0 ; W > W_L$	Liquide

L'état liquide est caractérisé par une très grande teneur en eau qui rend les particules solides quasi indépendantes (c'est presque une suspension). Aucun contact entre les solides n'a lieu, les couches d'eau adsorbées sont épaisses et maintiennent les grains écartés. Le matériau ne présente pas ou très peu de résistance, c'est une vase ou une boue.

L'état plastique est caractérisé par une teneur en eau élevée (sol saturé) ; les couches d'eau adsorbées sont mises en commun et les liaisons entre grains se font par elles. Due à la viscosité de ces couches d'eau, la résistance est faible et le sol peut donc être pétri ou modelé sans changement de volume.

Le solide avec retrait (état semi-solide) correspond à des teneurs en eau suffisamment faibles pour que les grains aient des contacts entre les particules solides même si le milieu est encore saturé ou quasi-saturé. Ces contacts augmentent la résistance et diminuent fortement la déformabilité ; les retraits lors d'une dessiccation sont encore importants.

L'état solide (solide sans retrait) est, quant à lui, caractérisé par des teneurs en eau faibles pour lesquelles le matériau ne se contracte plus lors d'une dessiccation. Le milieu n'est plus alors saturé, les contacts solides sont renforcés par des actions capillaires et dans ces conditions, la résistance est importante.

Ainsi, en fonction de la teneur en eau, l'état d'un sol fin passe d'un comportement solide à un comportement liquide par des états intermédiaires dits semi-solide (ou solide avec retrait) et plastique.

Il y a lieu de souligner de ce qui précède que la plasticité d'un matériau naturel est une propriété caractéristique des éléments fins en l'occurrence les argiles en relation avec l'existence des couches d'eau adsorbées. Ainsi, les limites d'Atterberg et en particulier l'indice de plasticité d'un sol varient non seulement avec l'importance de sa fraction argileuse mais également avec la nature des minéraux argileux et des cations adsorbés. A titre d'exemple, le tableau n°20 montre que les

valeurs les plus fortes de cet indice sont obtenues avec les montmorillonites et plus particulièrement celles chargées du cation de sodium (CORNELL, 1951 cité par CALLAUD M.J., 2004).

Tableau 20: Limites d'Atterberg et indices de plasticité de certains minéraux argileux

Minéraux argileux	Ions métalliques	W _p (%)	W _L (%)	I _p
Kaolinite	Na	32	53	21
	K	29	49	20
	Ca	27	38	11
	Mg	31	54	23
	Fe	37	59	22
Montmorillonite	Na	54	710	656
	K	98	660	562
	Ca	81	510	429
	Mg	60	410	350
	Fe	75	290	215
Illite	Na	53	120	67
	K	60	120	60
	Ca	45	100	55
	Mg	46	95	49
	Fe	49	110	61
Argile d'Orly (France)	-	32	18	14
Argile de Londres	-	80	30	50
Argile de Mexico	-	500	375	125

II.4.1.3.3.4. Degré de cristallinité

Les minéraux argileux comportent généralement des défauts cristallins. Par exemple, dans la nature, les kaolinites existent sous des formes allant de très bien cristallisées à très désordonnées. Les propriétés physico-chimiques des kaolinites sont fortement dépendantes de la nature et de la quantité de défauts. Ces derniers peuvent rompre la périodicité du motif et consister soit à des irrégularités dans le réseau cristallin (dislocation ou interruption d'un plan réticulaire), soit à des défauts ponctuels dans la structure par la présence d'un atome laissant un nœud du réseau inoccupé ou d'un atome ou d'un élément excédentaire n'occupant pas la position d'un nœud. Une lacune ou une vacance se produit lorsqu'un élément minéral manque dans un site donné du réseau cristallin.

En effet, les kaolinites ordonnées se distinguent des kaolinites désorganisées par leur état de cristallinité. Les kaolinites ordonnées présentent une excellente

régularité minéralogique dans le réseau cristallin et donc des zones homogènes plus importantes que les kaolinites désordonnées.

Le degré de cristallinité compte donc parmi les paramètres recherchés pour la valorisation des argiles kaolinitiques notamment dans la composition des pâtes à papier. Les argiles kaolinitiques non modifiées ont un caractère semi-renforteur des gommes naturelles ; ce pouvoir est d'autant plus grand que les argiles utilisées sont pures et bien cristallisées. La teneur en kaolinite est favorable au semi-renforcement tandis que les teneurs en quartz et en micas lui sont défavorables (DELON J.F. et al., 1982 ; YVON J. et al., 1982 ; NJOPWOUO D., 1988).

De nombreuses relations empiriques ont été établies afin d'estimer ce désordre cristallin. Elles sont basées sur l'intensité, la hauteur et la forme des pics de diffraction des bandes (hk0) des spectres de rayons X et dans le domaine de vibration de valence des hydroxyles sur les spectres infrarouges.

Sur les diffractogrammes de poudres (XRD), on note l'influence de l'état cristallin sur la forme des raies de diffraction caractéristiques de la kaolinite : des raies intenses et fines deviennent diffuses, et mal résolues, avec l'augmentation du désordre structural et des défauts d'empilement des feuillets de la kaolinite. Lorsque le désordre cristallin augmente dans le plan (a, b), les raies correspondantes deviennent plus larges et leur intensité diminue. Elles peuvent même constituer des ensembles sans pics distincts. L'indice de cristallinité le plus utilisé est celui décrit par Hinckley (HINCKLEY D.N., 1962). Sensible à l'ensemble des défauts présents dans le plan (a, b), il est défini à partir des pics des bandes (02l) et (11l) en utilisant l'expression suivante :

$$H_i = (A + B) / A_t$$

A et B sont des hauteurs respectives des réflexions (1-10) et (11-1) par rapport au bruit de fond local et A_t est la hauteur du pic (1-10) mesuré à partir du fond continu existant en dehors de ces bandes. Il est prouvé qu'une relation existe entre l'évolution de l'indice de Hinckley d'une kaolinite et l'augmentation du nombre de défauts structuraux dès lors que tous les diffractogrammes sont enregistrés sur le même appareil et dans les mêmes conditions (CASTELEIN O., 2000).

La forme et la position des pics (001) des spectres de diffraction de la kaolinite peuvent aussi être utilisés pour estimer le nombre de défauts d'empilement selon l'axe c. Ces réflexions sont sensibles à l'épaisseur des domaines cohérents dans la direction [001]. Non seulement la largeur mais aussi la position des pics (00l), notamment (001) et 002), dépendent de la loi de distribution du nombre de feuillets.

La position de la raie (001) est d'autant plus décalée vers les petits angles que le nombre de défauts structuraux présent au sein du minéral est grand. La distance basale de la raie (001) de la kaolinite (0,715nm) augmente avec le nombre de défauts d'empilement ; les raies deviennent moins fines lorsque le désordre augmente. Il est donc possible d'utiliser le critère de la largeur des raies pour estimer le degré de cristallinité des kaolinites dès lors que les pics concernés sont suffisamment isolés sur les diffractogrammes. La largeur à mi-hauteur de raies (001) et (002) est liée au nombre L de feuillets par domaine cohérent par la relation de Scherrer (AMIGO J.M. et al., 1994):

$$L = K\lambda / (\beta \cos\Theta)$$

β est la largeur à mi-hauteur du pic (001), Θ l'angle de diffraction, λ la longueur d'onde du faisceau incident et $K = 0,91$. On considère que la kaolinite est bien cristallisée quand L est voisin de 75 feuillets par domaine.

Le spectre infrarouge est également utilisé pour déterminer le degré de cristallinité des kaolins. Dans les domaines de vibration de valence des hydroxyles, l'existence simultanée des bandes de vibration à environ 3667 et 3651 cm^{-1} est caractéristique des kaolinites bien cristallisées (CASES J.M. et al., 1982). La figure n°17 montre que lorsque la cristallinité diminue, on observe la disparition progressive de la bande à 3667 cm^{-1} précédée de l'inversion des maxima des bandes situées à 3651 cm^{-1} (FIALIPS G.C., 1999).

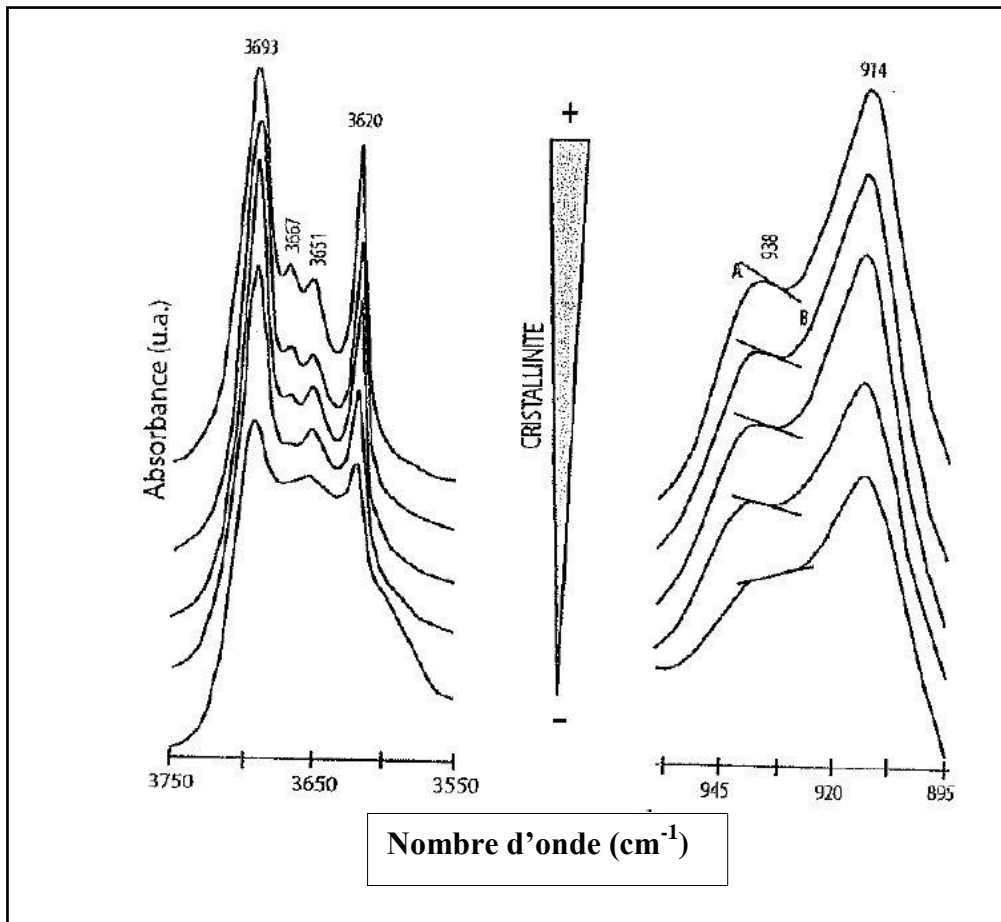


Fig. 17: Spectres infrarouges de kaolinites synthétiques d'ordre structural variable

Ces deux bandes sont souvent utilisées pour la détermination de l'indice de cristallinité des argiles kaolinitiques d'après la relation suivante (LIETARD O., 1977) :

$$P_2 = (I/I_0)_{3667 \text{ cm}^{-1}} / (I/I_0)_{3651 \text{ cm}^{-1}} \quad P_0 = (I/I_0)_{3619 \text{ cm}^{-1}} / (I/I_0)_{3695 \text{ cm}^{-1}}$$

La kaolinite est de bonne cristallinité si P_2 est inférieur à 1 et P_0 supérieur à 1.

Les deux bandes de vibrations de déformation des hydroxyles situées à 938 cm^{-1} et à 914 cm^{-1} permettent de définir l'indice de cristallinité P_1 (CASES J.M. et al., 1982). Lorsque la cristallinité diminue, la bande 938 cm^{-1} se transforme en épaulement et la pente du segment A-B passant par le point d'inflexion entre les deux bandes diminue (Fig.17). La valeur de P_1 est estimée par la mesure de la pente du segment A-B. Si cet indice est mesuré en pourcentage de transmission, la pente est positive lorsque la kaolinite a une bonne cristallinité et diminue lorsque le désordre s'accroît.

II.4.2. Procédés de fabrication

Malgré le large assortiment des céramiques, la diversité de leurs formes et leurs propriétés physico-mécaniques et le type d'argile utilisé, les étapes de fabrication de produits céramiques sont similaires. Elles comprennent la préparation, le façonnage, le séchage, les éventuels traitements de surface et la cuisson (JOUENNE C.A., 1984 ; CERATEC, 1987 et 1997 ; CDI-CRATERRE, 1996 ; UBA, 2001 ; CERAME-UNIE, 2003 ; INFOMIL, 2003).

II.4.2.1. Préparation

La préparation vise comme objectif d'obtenir une pâte plastique et homogène ou une poudre adéquate suivant le produit à façonner. On accuse souvent le séchage ou la cuisson d'être à l'origine des défauts observés à la sortie du four et beaucoup plus rarement la préparation ou le façonnage. Les causes d'une production médiocre sont pourtant nombreuses au niveau de la préparation :

- un dosage irrégulier du mélange entraîne une dispersion des caractéristiques des produits finis, accompagnée parfois des séquences de déchets anormaux ;
- une mauvaise homogénéisation du mélange provoque des fissures au séchage et donne des produits hétérogènes ;
- un dosage irrégulier de l'humidité rend impossible l'équilibrage de la filière, favorisant les fentes et déformations au séchage ;
- une mauvaise désaération de l'argile perturbe le séchage, diminue la cohésion des produits et modifie les propriétés du produit fini.

La préparation nécessite donc diverses opérations qui diffèrent quelque peu selon le matériau disponible et le degré de plasticité de la pâte désirée et du type à fabriquer. Une ou plusieurs d'entre elles peuvent être employées pour préparer les matières premières.

II.4.2.1.1. Pré-séchage et pré-mélange

Certaines matières premières comme le sable ont besoin d'être pré-séchées par la technique du lit fluidisé ou au moyen de séchoirs rotatifs. De nombreuses matières premières raffinées pour la céramique s'achètent auprès de fabricants spécialisés généralement à l'état sec.

Le mélange des argiles peut commencer dès la carrière, notamment par creusement sélectif ou par empilement de la matière selon les lithofaciès en présence en vue d'alimenter l'usine.

II.4.2.1.2. Concassage et broyage primaires

Un premier concassage grossier d'argiles relativement sèches ou friables peut être effectué par des rouleaux de concassage à grosses dents, généralement implantés dans la carrière, ou par des grands concasseurs à mâchoires qui servent également à fragmenter les matières premières très dures utilisées dans la fabrication des produits réfractaires.

Dans l'industrie de la terre cuite, les rouleaux de concassage s'emploient couramment pour désagréger, écraser et homogénéiser les particules d'argiles. Le contrôle granulométrique se fait par réglage de l'espace entre les rouleaux.

Les broyeurs à meules verticales, par voies sèche ou humide, conviennent à la fragmentation des matières premières à plus forte plasticité et permettent d'assurer une granulométrie prédéfinie (généralement de 2 mm ou plus) ou un mélange des argiles sous apport d'eau.

II.4.2.1.3. Broyage

Pour obtenir des particules plus fines (d'environ 1 mm de diamètre) exigées dans les applications céramiques comme les carreaux pour sols et murs, les produits réfractaires et la vaisselle de tables, on emploie des broyeurs à rouleaux par voies sèche ou humide.

Un broyage encore plus fin peut être obtenu avec des broyeurs à boulets continus ou discontinus dans lesquels on fait tourner des boules de céramique dure dans des tambours montés à l'horizontale. Ce genre d'outils constitue le choix nominal pour l'industrie des carreaux pour sols et murs car ils permettent de produire des poudres d'un grain inférieur à deux cents microns.

II.4.2.1.4. Criblage et classification

Afin d'optimiser certaines propriétés des céramiques (par exemple la densité), il est parfois nécessaire de mélanger certaines granulométries de matières. Le criblage à sec consiste généralement à utiliser des tamis vibrants, qu'on chauffe électriquement pour éviter les accumulations de matières et le colmatage.

Les classificateurs pneumatiques à base de cyclones de séparation peuvent également servir au dimensionnement granulométrique des poudres à sec.

II.4.2.1.5. Mélange des composants

Les matières premières préparées dans des proportions contrôlées doivent être malaxées et homogénéisées pour obtenir l'uniformité physicochimique requise. Généralement, on optimise les propriétés de certains produits en malaxant avec précaution plusieurs fractions granulométriques de matières premières. En briqueterie par exemple, on mélange également l'argile à des additifs de type combustible solide afin de réduire le temps de cuisson.

En fonction du secteur céramique concerné, le mélange peut varier entre les opérations continues à grande échelle et un mélange discontinu et étroitement contrôlé à petite échelle. Le dosage peut se faire sur une base volumétrique (par exemple via des alimentateurs linéaires placés sur des convoyeurs à bande) ou par poids (via des alimentateurs à vis reliés à des doseurs à bande). Le mélange à continu se réalise par le mélangeur à une ou deux hélices (couramment utilisé dans l'industrie de terre cuite), le broyeur à meules, le déchiqueteur ou le concasseur giratoire à percussion. Les mélangeurs discontinus peuvent être à lame (pétrin), à tambour, à cuve tournante (mélange argile en granulés avec de fines poudres) ou à cuve d'agitation (pour le mélange de barbotines et diverses suspensions aqueuses).

II.4.2.1.6. Autres

Des préparations spécifiques peuvent s'avérer nécessaires dans la fabrication de certains produits céramiques. C'est le cas de la calcination (par exemple dolomite ou magnésite pour la fabrication des réfractaires), de la préparation de l'émail (frittes c'est-à-dire des composés vitreux, insolubles dans l'eau et qui sont préparés à partir de matières cristallines par fusion à haute température, additifs et agents colorants : bases, titane, fer, cobalt,...) et des matières synthétiques de base (carbure de silicium par exemple).

II.4.2.2. Façonnage

Une fois la pâte convenablement préparée, il faut lui donner les formes désirées c'est-à-dire celles des produits finis envisagés. Cette opération s'appelle façonnage et présente un double rôle. Le premier rôle est de donner à la pâte argileuse une cohésion suffisante pour que celle-ci puisse être façonnée à la forme desdits produits finis. Cette cohésion déjà existante dans une certaine mesure, peut notamment être augmentée grâce à l'élimination dans l'argile, à l'aide du vide, de l'air occlus entre les particules ou à l'action d'une pression. Ces occlusions d'air gênent la cohésion entre particules d'argile et ne permettent pas de ce fait aux forces de liaison entre ses particules de s'exercer avec le maximum d'intensité. Le

second rôle est celui de donner à la masse argileuse non seulement la forme désirée mais aussi la résistance mécanique en sec.

Les produits céramiques traditionnels ont toujours été façonnés à partir de matières premières à l'état plastique et cette opération, pendant des millénaires, a été manuelle. A l'heure actuelle, il existe une demande pour des spécifications techniques de plus en plus strictes englobant des propriétés telles que la tolérance dimensionnelle, la densité, la résistance, la durabilité et la réfractarité. Par ailleurs et dans de nombreux cas, les qualités esthétiques sont de première importance. La méthode utilisée pour façonner les produits peut donc influencer de manière considérable sur les propriétés définitives de ceux-ci, et la gamme des techniques de façonnage s'est considérablement développée entre les différents secteurs de l'industrie céramique.

II.4.2.2.1. Pressage

Cette technique de façonnage des produits céramiques peut-être mécanique, hydraulique, par friction, par impact ou isostatique. Les deux premières sont les plus utilisées dans la céramique grossière de la construction.

Le pressage mécanique s'emploie dans la briqueterie et la fabrication des produits réfractaires. On charge les moules avec un volume prédéfini de granulé d'argile et l'on applique une pression par le haut et par le bas.

D'une grande productivité et disposant d'une force de compactage élevée, de nombreuses presses hydrauliques sont équipées de systèmes de commande électroniques qui sont capables de vérifier la hauteur des produits et de régler automatiquement le cycle pour assurer l'uniformité des dimensions. Ces presses conviennent bien pour façonner de formes réfractaires complexes, de carreaux céramiques et de tuiles. Dans le cas des carreaux céramiques, la poudre humide est pressée dans des moules peu profonds, alors que les tuiles sont généralement formées par pressage de « galettes » d'argile plastique découpées dans un boudin extrudé.

Bien que progressivement remplacées par des presses hydrauliques, les presses à friction à entraînement mécanique sont généralement utilisées pour la fabrication de formes réfractaires.

Certains produits nécessitent une densification uniforme qui peut s'obtenir en appliquant la même pression sur toutes les surfaces. Dans une presse isostatique,

on remplit des moules en caoutchouc ou en polyuréthane de poudre céramique et on les place dans une cuve remplie de liquide. On applique ensuite une pression hydrostatique élevée, puis on démoule les produits. Cette méthode est employée dans les secteurs des réfractaires et des céramiques techniques ainsi que dans la fabrication des carreaux et de la vaisselle de table.

II.4.2.2.2. Extrusion

L'extrusion s'utilise couramment pour la fabrication continue et à grande échelle des briques (produits perforés) et blocs de maçonnerie légers, des tuyaux en grès, de dalles, des tuiles et des carreaux céramiques pour sols et murs. Elle exige une matière première plastique, donc une teneur en argile importante.

On malaxe la pâte avec de l'eau jusqu'à obtenir la consistance souhaitée, puis on la force à travers la filière de l'extrudeuse, généralement au moyen d'une puissante étireuse. Une phase de désaéragé sous vide est prévue avant l'étireuse, pour améliorer la consolidation du boudin d'argile. On découpe enfin ce dernier en unités d'une longueur requise, en poussant des sections du boudin à travers plusieurs fils verticaux fortement tendus.

II.4.2.2.3. Moulage

La brique la plus ancienne connue (non cuite) et qui remonte à plus de 10.000 ans a été fabriquée par moulage qui compte parmi les techniques anciennes de façonnage des produits en argile. Dans de nombreux pays du monde, les systèmes en adobe sont encore couramment utilisés.

Le moulage était manuel et l'on a créé des simples moules en bois afin d'assurer des formes et dimensions plus uniformes. Le moulage des produits en argile nécessite beaucoup moins de puissance et d'énergie que le pressage ou l'extrusion, mais il lui faut un mélange beaucoup plus tendre (humide), ce qui entraîne davantage de retrait au séchage et un apport d'énergie calorifique plus important pour le séchage. Il existe actuellement des machines perfectionnées pour le moulage mécanique des briques. Ces machines « jettent » des mottes d'argile dans des moules préalablement sablés. Le moulage des produits se pratique également dans le secteur des réfractaires, afin de former des produits grand format (pesant plus d'une tonne). Le mélange qui doit avoir une viscosité précise est coulé dans le moule par le procédé qui porte le nom de « fromage par vibromoulage » ; les vibrations appliquées au moule directement ou indirectement à l'aide des aiguilles

vibrantes servent à consolider le mélange et à assurer un remplissage complet du moule.

II.4.2.2.4. Coulage en barbotine

Cette technique de façonnage est largement utilisée dans la fabrication des appareils sanitaires, de la vaisselle et des objets décoratifs ainsi que pour la fabrication des céramiques techniques et des produits réfractaires spéciaux et complexes.

On mélange la matière minérale finement broyée avec de l'eau pour produire une barbotine (suspension aqueuse stable) que l'on verse dans un moule poreux traditionnellement en plâtre à gypse durci. La capillarité du moule extrait le liquide de la suspension pour former une coulée extrêmement solide sur la surface interne du moule. L'épaisseur de la paroi augmente progressivement et, au fil du temps, on obtient un corps solide avant démoulage.

II.4.2.3. Séchage

La préparation de la pâte nécessite la présence d'eau pour la rendre plus facile au façonnage. Cette eau est à éliminer une fois le produit ayant pris forme. Le séchage a pour but d'éliminer lentement l'eau de façonnage et éventuellement l'eau contenue dans le matériau argileux de base sans déformer le produit et permettre sa manutention et son empilement.

Il convient de noter à cet effet que l'élévation de la température, en provoquant l'évaporation de l'eau, constitue le moteur du séchage. Plus la température est élevée, plus rapide est l'évaporation, donc le séchage. Mais, une élévation trop rapide de température ne tenant pas compte de l'humidité régnant dans le séchoir (chambre) provoque des déformations, des fentes et parfois même des éclatements. Si l'humidité de l'air est suffisamment forte, quelle que soit la température du séchage utilisée, la substance argileuse ne perd pas son eau, ne sèche pas. Ce phénomène permet donc d'élever la température d'un produit argileux sans le déshydrater.

C'est ainsi que dans l'industrie céramique moderne, il est nécessaire d'optimiser le séchage en termes de vitesse, de rendement thermique et de réduction des déchets. Aujourd'hui, la chaleur de l'air de séchage est principalement fournie par des brûleurs à gaz et par l'air chaud récupéré de la zone de refroidissement des fours. La chaleur pour l'air de séchage peut également être fournie par cogénération ou par un autre combustible tel que le charbon, le biogaz ou le coke de pétrole.

Il existe plusieurs procédés de séchage dont les plus importants sont le séchage naturel et le séchage artificiel.

II.4.2.3.1. Séchage naturel

Il se pratique par exposition des produits dans des hangars légers à l'air libre. Ceci demande de grandes aires de dessiccation et une quantité importante de main-d'œuvre. Très long à réaliser, ce type de séchage donne lieu à des produits irréguliers et n'est actuellement utilisé que dans l'exploitation artisanale.

II.4.2.3.2. Séchage artificiel

Il s'effectue dans des installations industrielles permettant d'assurer à la fois un chauffage progressif et une ventilation régulière. Le séchage est rationnel grâce au conditionnement de l'air utilisé, à l'évaporation et au réglage de l'hygrométrie de l'air et de la ventilation. Les installations dans lesquelles ce type de séchage se pratique sont nombreuses.

(1) Séchoirs à chambres (intermittents)

Ces séchoirs présentent un intérêt particulier lorsqu'il s'agit de fabriquer diverses pâtes céramiques ; lorsque les pâtes ont une teneur élevée en eau, ou lorsque la fabrication se fait par intermittence.

Ils comportent une batterie de chambres dotées de trappes d'entrée à ajustement serré, généralement desservies par des rails véhiculant des wagonnets de séchage. Ces derniers sont chargés de palettes ou d'étagères de séchage, empilées verticalement selon un espacement uniforme. Des systèmes de convoyage entièrement automatiques ont maintenant été mis au point, avec une alimentation par wagonnet de transport des étagères permanentes du séchoir.

Les produits céramiques tels que briques, blocs, tuyaux et formes réfractaires sont posés sur les étagères, et les wagonnets de séchage chargés sont transportés jusqu'à l'intérieur des chambres qui sont hermétiquement fermées une fois pleines. Dans les installations actuelles, toute cette opération est automatisée au plus haut degré. On élève la température de la chambre à une vitesse contrôlée, soit directement par injection d'air chaud, soit indirectement, via des surfaces de transfert de chaleur. Le transfert de chaleur se fait principalement par convection, et un peu par rayonnement grâce à l'air chaud et aux surfaces chauffées. On utilise

des profils de température et d'humidité qui correspondent à tel ou tel produit céramique.

(2) Séchoirs verticaux

Le séchoir vertical sert principalement dans le secteur du carrelage céramique ; les carreaux étant introduits dans des paniers constitués de plusieurs étages de rouleaux. Ces groupes de paniers montent à travers les séchoirs, où ils rencontrent des gaz de séchage chauds. La température régnant dans un séchoir de ce type est généralement inférieure à 200°C et les cycles de séchage varient entre 35 et 50 minutes.

(3) Séchoirs tunnel (continu)

Il s'agit essentiellement d'une longue structure en tunnel, le long de laquelle on pousse une file de wagonnets de séchage chargés de produits en céramique crue. On introduit de l'air à haute température dans le tunnel par l'extrémité de sortie, cet air étant amené à s'écouler vers l'extrémité d'entrée grâce à un ou plusieurs ventilateurs. Au fur et à mesure que l'air descend dans le séchoir, il transfère de la chaleur au produit céramique et sa teneur en humidité augmente.

(4) Séchoirs à rouleaux (à étages horizontaux)

Egalement utilisé chez les fabricants de carrelage céramique, ce type de séchoir est conçu selon le principe du four à rouleaux. Les carreaux individuels sont introduits sur les différents étages situés à l'intérieur du séchoir et sont acheminés horizontalement par des rouleaux d'entraînement. Des brûleurs situés sur les côtés du séchoir produisent l'air chaud de séchage, lequel circule à contre-courant des produits.

La température maximale de ces séchoirs est généralement supérieure à celle de leurs homologues verticaux (environ 350°C) et leurs cycles de séchage sont plus courts, entre 15 et 25 minutes.

(5) Séchoirs à plancher chauffant

La technique du séchage des produits céramiques dans les séchoirs à plancher chauffant est trop simple et n'est adaptée ni à la mécanisation, ni à l'automatisation. En revanche, elle peut toujours servir pour un séchage lent et doux d'articles

céramiques complexes grand format comme les appareils sanitaires, certains produits réfractaires ou certaines briques spéciales.

L'action de séchage dans ce type d'installation résulte de la chaleur qui est transmise directement à la base des produits en contact avec un plancher chauffé, et des courants de convection de l'air au-dessus de ce plancher. Les flux d'air latéraux sont minimales, et toutes les surfaces des produits sèchent à basse vitesse, ce qui évite de soumettre inutilement la pâte à des contraintes au cours du séchage.

II.4.2.4. Traitements de surface et décoration des produits

II.4.2.4.1. Texturation et revêtements

On peut texturer la surface d'un produit en argile pour des raisons esthétiques ou fonctionnelles, par exemple pour obtenir une finition antidérapante sur les carreaux de sol.

Les briques à pâte molle acquièrent une agréable forme aléatoire « à plis » au fur et à mesure que la motte d'argile est jetée dans le moule, et le moulage manuel produit des finitions particulièrement appréciées. Les produits extrudés peuvent être texturés par raclage, en raclant la surface du boudin d'argile. Des rouleaux texturés peuvent également donner diverses textures aux produits extrudés. Les briques pressées sont souvent assez dures à l'état cru et, une fois qu'elles sont assemblées sous forme de boudin continu sur un convoyeur à bande, on utilise des lames tournantes pour leur donner un aspect « rustique » ou pour texturer ces briques.

Les briques à pâte molle reçoivent un revêtement de surface en sable provenant de l'intérieur des moules, lesquels ont été préalablement enduits d'un sable servant d'agent de démoulage. On peut obtenir toutes sortes de textures et de couleurs de cuisson en choisissant le sable selon des critères d'esthétique. Dans le cas des briques, des blocs ou des tuiles pressés ou extrudés, on peut appliquer du sable ou d'autres minéraux en granulats sur les surfaces de boutisses ou paneresses au moyen de pistolets à air comprimé. On ajoute souvent des pigments au sable pour faire varier l'aspect esthétique de la finition.

II.4.2.4.2. Emaillage et engobage

L'émaillage est la technique la plus répandue dans la fabrication des carreaux pour sols et murs, des appareils sanitaires, de la vaisselle de table et des tuiles. Lors de l'émaillage, dans la plupart des secteurs céramiques concernés, on fait durcir le produit en céramique crue séché par une cuisson de biscuit puis, selon les

composants de d'émail appliqués (par trempage dans le bain d'émail ou projetés au pistolet), on le recouvre d'une couche vitreuse, lisse, transparente ou sombre. Cette technique permet donc d'imperméabiliser les produits céramiques poreux.

L'engobage est employé principalement dans la fabrication des tuiles en argile et des carreaux céramiques pour sols et murs. Il s'applique généralement à l'issue du séchage et, dans certains cas, les produits sont engobés même à l'état cru ou cuit. Pendant ce procédé, on applique une couche de masse céramique à grain fin, non transparente, claire ou colorée sur la partie visible ou sur la totalité de la surface. L'opération se pratique par pulvérisation, par trempage ou par coulage. Il existe des engobeurs automatiques.

II.4.2.5. Cuisson

II.4.2.5.1. Objectifs

En fabrication de produits de terres cuites comme dans tout autre processus d'élaboration de produits céramiques, la cuisson doit être considérée comme une phase fondamentale puisqu'elle confère aux produits finis leurs caractéristiques définitives et leur plus ou moins bonne aptitude à l'emploi.

La cuisson donne lieu à des transformations capitales du matériau argileux initial, et si ces transformations sont incomplètes, la composition physico-chimique finale peut varier notablement. Ces transformations correspondent surtout à des réactions à l'état solide, assez lentes, ce qui confère toute son importance à la notion de chronothermie ou de maintien de température en palier. Il s'agit donc d'une consolidation sans fusion totale du matériau céramique mis en forme et laquelle est souvent accompagnée d'une densification (élimination des pores) et d'un grossissement des grains (diminution du nombre de grains).

On comprend dès lors que le processus de cuisson présente des conséquences pratiques importantes liées principalement aux variations :

- pondérales (pertes en poids) ;
- dimensionnelles (dilatations et retraits) ;
- structurales qui conditionnent étroitement les caractéristiques du tesson cuit.

Le tableau n°21 présente les températures habituelles utilisées pour la cuisson de produits céramiques (JOUENNE C.A., 1984 ; ELFIL H. et al., 1995 ; BAÏLON J.P., DORLOT J.M., 2003 ; CERAME-UNIE, 2005 ; DJANGANG C.N. et al., 2008).

Tableau 21: Températures de cuisson usuelles des produits céramiques

Produits céramiques	Température de cuisson (° C)
Réfractaires	1400-1600
Porcelaines	1100-1400
Carreaux	1000-1250
Sanitaires	1200-1280
Vitreous	1200-1280
Faïences	900-1200
Poterie	900-1100
Terres cuites	950-1050
Grès	1100-1300

II.4.2.5.2. Installations pour la cuisson

La cuisson des produits céramiques se réalise dans plusieurs types de fours regroupés en fours intermittents et continus (CERATEC, 1997).

II.4.2.5.2.1. Fours intermittents

Les fours à feu intermittent ou fours intermittents (à chambre unique) sont utilisés dans le cas de productions spéciales de petites séries des produits tels que les briques, les raccords de canalisation, les raccords pour tuiles et les produits réfractaires. Ils sont généralement à flamme renversée de forme circulaire ou rectangulaire.

Dans ce type de fours, les flammes s'élèvent d'abord le long des parois intérieures jusqu'à la voûte, pour ensuite sortir par les orifices percés dans la sole située dans la partie inférieure du four. Ce système de chauffe permet une bonne répartition de température car les gaz les plus chauds, et donc les plus légers, qui tendent à s'élever sont continuellement appelés vers le bas grâce à un tirage descendant. On utilise également pour chauffer les fours intermittents, notamment dans la fabrication des céramiques techniques. Les fours spéciaux destinés aux céramiques

techniques sont, par exemple, les fours de type HIP (pression isostatique à chaud), les fours à haute température et les fours à atmosphère protectrice.

Afin d'élever les flammes le long des parois, la bouche des foyers, généralement alignés latéralement à la base du four, est enfermée dans un conduit en maçonnerie ouvert à sa partie supérieure.

II.4.2.5.2.2. Fours continus

(1) Fours tunnels

Apparus dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle, les fours tunnels permettent, avec un encombrement moindre et une plus rapide cuisson, la production massive des pièces en céramique (briques, tuiles, cuvettes, hourdis, ...). Dans ces fours, la fournée est chargée sur des wagonnets qui parcourent un tunnel rectiligne et passe successivement par les zones dites de « préchauffage », de « cuisson » et de « refroidissement ».

Ces fours ont l'avantage de faciliter la manutention des pièces et d'éviter de réchauffer inutilement les maçonneries du four après les avoir refroidies. Les fumées de combustion sont utilisées pour le préchauffage des pièces à cuire et l'air utilisé pour le refroidissement des pièces cuites est envoyé au niveau des séchoirs pour la déshydratation des pièces en « cru ». Ce qui permet des économies significatives en combustibles. Des dispositifs de régulation automatique permettent une cuisson régulière et des équipements pyrométriques contrôlent les températures de cuisson suivant les types d'argiles et les produits désirés.

(2) Fours Hoffmann (Fours à chambres)

Largement utilisés pour la fabrication de briques, les fours « Hoffmann » sont caractérisés par un feu continu mobile et sont constitués de deux galeries longitudinales accolées, en communication à leurs extrémités. Ce système de liaison, avec des conduits de fumée et des orifices entre les chambres, permet également de préchauffer les produits et de refroidir les effluents gazeux, ce qui améliore le rendement thermique et permet de réduire les coûts par rapport à un four à feu intermittent. Dans cet ouvrage, l'enfournement et le défournement des pièces en céramique sont assurés par l'intermédiaire de portes réalisées dans les murs extérieurs.

(3) Fours à rouleaux

Les fours à rouleaux à un étage s'utilisent de façon quasi universelle pour la fabrication des carreaux pour sols et murs, et les programmes de cuisson ont été

réduits à moins de 40 minutes. Ils servent également pour la fabrication de tuiles, de tuyaux en grès, d'appareils sanitaires et de vaisselles de table.

Les produits à cuire sont transportés par des rouleaux d'entraînement, et la chaleur de cuisson est fournie par des brûleurs à gaz naturels et air qui sont situés sur les côtés du four. Les principaux mécanismes de transmission de la chaleur sont la convection et le rayonnement, et comme les fours ne sont pas pourvus d'une moufle, les coefficients de transmission de la chaleur sont plus élevés, ce qui permet de réduire le cycle de cuisson et la consommation d'énergie.

(4) Fours à dalles glissantes

Ces fours fonctionnent sur un principe similaire à celui des fours à rouleaux. Toutefois, les fours à dalles glissantes présentent les particularités suivantes :

- les produits à cuire sont placés sur des wagons réfractaires qui se déplacent sur des roues montées sur des rails extérieurs au four proprement dit ;
- ces fours peuvent cuire des produits de taille et de forme plus ou moins irrégulière.

(5) Fours rotatifs

Utilisés pour la fabrication des granulats d'argile expansée ou à la calcination de l'argile réfractaire et à celle de la dolomite ou de la magnésite, les fours rotatifs se présentent sous forme d'un long cylindre, généralement incliné et tournant lentement autour de son axe. Ils fonctionnent avec des brûleurs fixés axialement par rapport aux extrémités inférieures de fours.

(6) Cuisson en meule

Ces genres d'installation sont conçus pour la fabrication des briques traditionnelles. On assemble des briques séchées, contenant un additif combustible solide (par exemple des fines de coke) en gros blocs denses et rectangulaires appelés « meule » sur un socle de briques cuites. On mélange des conduits de fumées dans les couches de base, avec des couches de coke pour lancer la cuisson. On habille enfin la meule de briques cuites, en inclinant les parois externes vers l'intérieur pour améliorer la stabilité.

Une fois l'ensemble allumé, le feu progresse lentement en brûlant le combustible contenu à l'intérieur des briques. La cuisson de la meule dure plusieurs semaines, temps de refroidissement compris, après quoi la meule est démontée manuellement et les briques sont triées selon les qualités prédéfinies.

II.4.2.5.3. Transformations chimiques et minéralogiques

A l'exception des produits céramiques obtenus à partir des substances non argileuses, les matières premières utilisées dans les pâtes céramiques sont généralement des mélanges complexes de minéraux argileux avec d'autres matières minérales comme le quartz, les feldspaths, les carbonates, les micas, le gypse, les oxydes divers et parfois des matières organiques.

Lorsque des pâtes céramiques à base d'argiles cuisent dans le four, diverses modifications physico-chimiques et minéralogiques s'opèrent. Les principales modifications sont la décomposition de la structure réticulée des minéraux argileux d'origine, suivie de la formation de nouveaux composés cristallins et des phases vitreuses.

II.4.2.5.3.1. Elimination de l'eau et oxydation

De la température ambiante à 200°C, l'échauffement provoque l'élimination de l'eau résiduelle. L'échantillon subit une faible perte de poids d'environ 1 à 4% suivant les types argileux.

Entre 450 et 650°C, le minéral argileux se transforme d'une manière irréversible : il perd son eau de constitution et subit une modification structurale profonde (modification de son édifice cristallin). La perte de cette eau est associée à un pic endothermique sur les courbes d'analyse thermique différentielle (TOUSSAINT F. et al., 1963 ; SONUPARLAK B. et al., 1987).

Si des matières organiques et des pyrites sont présentes, une oxydation se produit à des températures comprises entre environ 300 et 500°C.

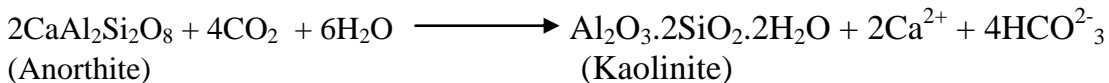
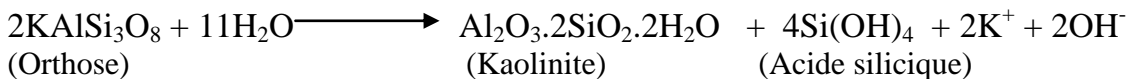
II.4.2.5.3.2. Mullitisation

Les phases minéralogiques susceptibles de cristalliser lors du chauffage des matériaux kaolinitiques sont données dans le tableau n°22 (OKADA K. et al., 1986 ; CHAKRAVORTY A.K., GHOSH D.K., 1991 ; LEE S. et al., 1999 ; ELIMBI A., 2004 ; MONTEIRO S.N., VIEIRA C.M.F., 2004).

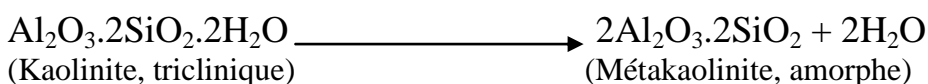
Tableau 22: Phases minéralogiques formées au cours de la cuisson

Plages de températures (principales)	Phases minéralogiques	Formules
-	Kaolinite	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
400-600	Métakaolinite	$2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
900-1000	Spinelle	$2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$
≥1000	Mullite	$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
	Cristobalite	SiO_2

La kaolinite est généralement générée par altération chimique (hydrolyse) des minéraux tels que les micas, les plagioclases et plus particulièrement les feldspaths qui comptent parmi les constituants essentiels des roches magmatiques granitiques et sédimentaires arkosiques (MILLOT G., 1964 ; MURRAY H.H., et al., 1978 ; MITCHELL D., VINCENT A., 1997 ; NJOYA A., 2007).



Issue de la transformation de la kaolinite par déshydroxylation, la métakaolinite est une phase quasi amorphe.



Sa réorganisation structurale liée à un pic exothermique est expliquée dans la littérature par des phénomènes suivants :

- l'apparition d'une phase de structure spinelle et/ou de la mullite dite primaire. La composition de la phase de type spinelle est variable selon les auteurs : $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (BRINDLEY G., NAKAHIRA M., 1959 ; SRIKRISHNA K. et al., 1990) , $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$ (CHAKRATORVY A.K., GHOSH D.K., 1978 et 1991) , $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (PERCIVAL H.J. et al., 1974 ; LEONARD A.J., 1976 ; MAZUMDAR S., MUKHERJEE B., 1983 ; BROWN I.W.M. et al., 1985 ; OKADA K. et al., 1986 ; SONUPARLAK B. et al., 1987) ;
- l'évolution de l'élément aluminium vers la coordinence VI la plus stable (SANZ J. et al., 1988 ; PASK J.A., TOMSIA A.P., 1991) ;
- l'extraction de la silice amorphe (LEE S. et al., 1999).

vitreuse par les mécanismes suivants (LIU K. et al., 1994 ; CHEN C.Y. et al., 2000 ; TEMUJJIN J. et al., 2000):

- interdiffusion à l'état solide entre l'alumine et la silice ;
- dissolution des phases riches en Al_2O_3 par liquide eutectique métastable, suivie d'une précipitation de la mullite ;
- réaction entre les phases riches en Al_2O_3 et les impuretés présentes dans la phase visqueuse riche en SiO_2 conduisant à la formation d'un liquide transitoire, à partir duquel précipiterait la mullite.

Actuellement, la présence seule d'une certaine quantité de mullite dans le matériau céramique ne constitue plus l'unique facteur essentiel pour justifier certaines propriétés physico-chimiques et/ou mécaniques. En effet, des études réalisées sur les matériaux céramiques à base d'argiles du Cameroun (KAMSEU E. et al., 2007 ; PIALY P., 2009) et du Brésil (ALCANTARA A.C.S. et al., 2008 ; CALABRIA J.A. et al., 2009) ont indiqué que :

- les microstructures sont responsables de la dégradation des propriétés physico-chimiques dans les briques cuites et adobes ;
- le module d'Young apparent du matériau présente une variation avec la température qui ne peut pas être entièrement justifiée par l'évolution de la porosité ou par la simple quantité de mullite formée. Cette propriété est sensible à l'évolution de la connectivité entre les phases rigides et le flux visqueux présent dans le matériau à haute température.

II.4.2.5.3.3. Transformations allotropiques du quartz

La silice cristallisée possède de nombreuses variétés allotropiques (Fig.18). La plus fréquente et la plus stable est le quartz α ou quartz de basse température qui peut se transformer, en fonction de la température, en plusieurs variétés allotropiques : d'abord en quartz β ou quartz de haute température, puis en d'autres variétés cristallographiques telles que la tridymite α et β et surtout la cristobalite α et β (JOURDAIN A., 1966 ; CERATEC, 1987 et 1997 ; LECOMTE G. et al., 2004 ; EL YAKOUBI N., 2006).

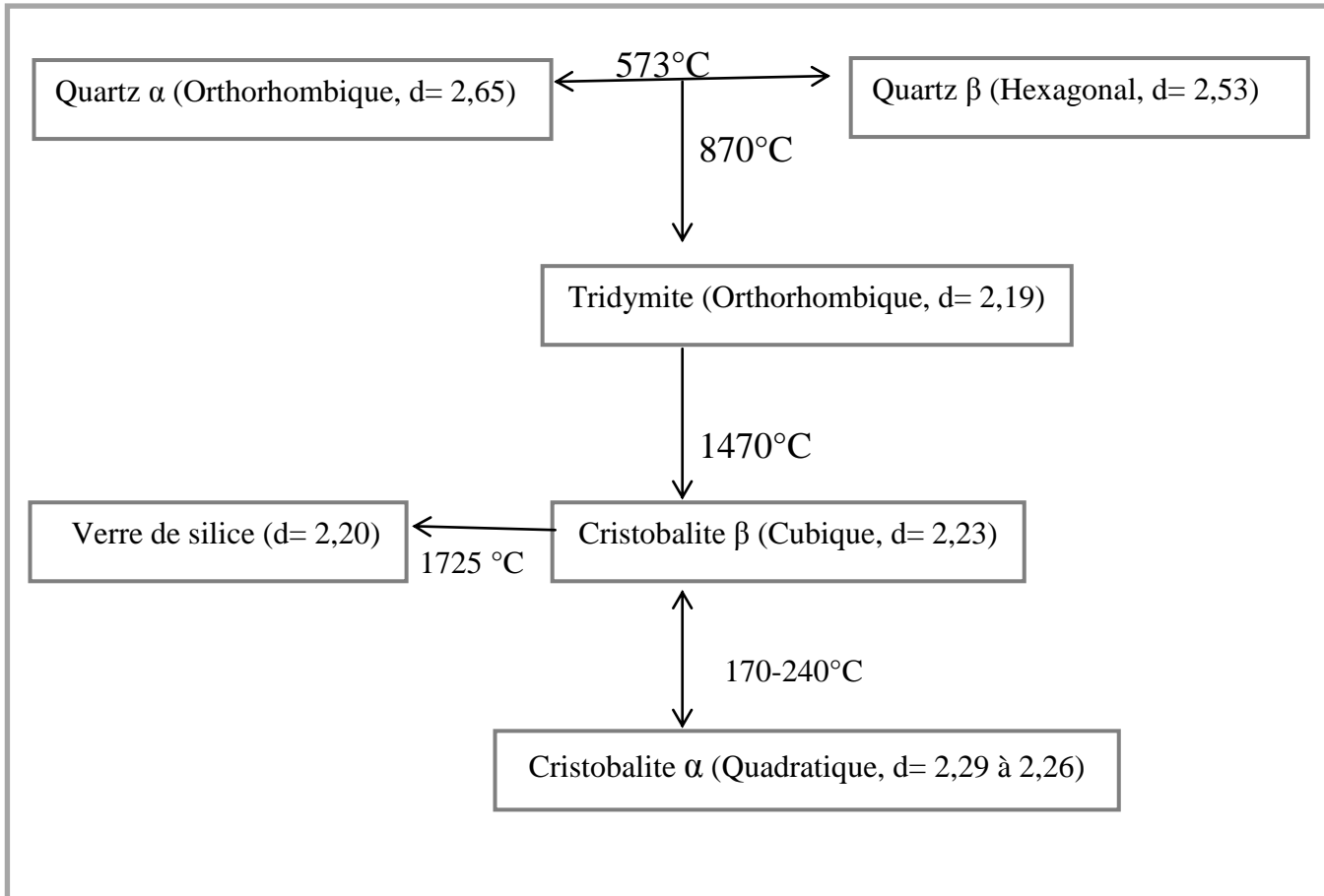


Fig. 18: Transformations allotropiques du quartz

Pour le quartz, le point de transformation α vers β est connu avec précision, $T=573^{\circ}\text{C}$, et le passage du quartz α (densité $d= 2,55$) au quartz β (densité $d= 2,53$) s'accompagne d'un accroissement de volume (brusque dilatation) de 0,83%. Ces modifications structurales entraînent une perte de poids sensible de l'ordre de 3 à 6% (CERATEC, 1997).

Les fissures de refroidissement, particulièrement plus dangereuses en fabrication des tuiles, sont essentiellement provoquées par la brusque contraction des grains de sable quartzueux aux environs de 573°C . Si la descente en température est trop rapide dans cette zone, la contraction du quartz entraîne en quelque sorte un décollement de ces grains par rapport à la masse, et ce décollement constitue des amorce des ruptures qui provoqueront la fêlure de la pièce, assez souvent à une température plus basse.

La transformation du quartz en tridymite se produit sous des conditions de réversibilité thermodynamiques nécessitant une vitesse de cuisson extrêmement lente, la présence de fondants et lorsque le quartz est libre. Lorsque le quartz β se

transforme en cristobalite β , aux environs de 1000°C, il se produit un accroissement considérable de volume de près de 16%.

La cristobalite est la phase cristalline qui se forme généralement à partir des températures voisinant 1000°C et après la mullite. A basse température, entre 170 et 240°C, la cristobalite β se transforme en cristobalite α de structure quadratique dont les grains peuvent avoir une morphologie massive, tabulaire ou fibreuse. Cette transformation s'accompagne d'un important changement de volume de près de 2,8%. Lorsque la concentration en cristobalite est élevée dans le matériau, la transformation de cristobalite α en cristobalite β provoque généralement des fissures dont la taille et le nombre influenceront les propriétés mécaniques de ce matériau céramique.

Les études expérimentales portant sur la dilatation thermique du quartz et de la cristobalite montrent que l'essentiel de ce phénomène a lieu pendant les transitions de phases.

Les phases β du quartz et de la cristobalite sont moins sensibles à l'augmentation de températures que les phases α . Elles présentent un palier entre 600 et 1500°C. Mais, il a été observé une anomalie dans l'évolution du volume de la cristobalite β et du quartz β avec la température à partir de 923°C : le volume de ces deux phases diminue quand la température augmente.

II.4.2.5.3.4. Les phases vitreuses

Lorsqu'on élabore un matériau céramique à partir des matières premières argileuses, la formation des phases cristallines qui constituent le squelette s'accompagne presque toujours de la production des phases vitreuses. Ces dernières, en liant les grains, se ramollissent en provoquant des déformations et jouent un rôle important dans la cohésion du matériau car elles favorisent sa densification (et donc l'élimination de la porosité) et améliore ses propriétés mécaniques.

La présence, même en faibles concentrations, des impuretés d'oxydes métalliques favorise la formation des phases vitreuses par réactions chimiques à haute température avec les phases cristallines principales. Du même coup, ce plus ou moins grand développement des phases vitreuses conditionne la porosité, la perméabilité, la résistance mécanique, les qualités réfractaires et les risques de déformation du matériau. Ainsi, la présence de plusieurs oxydes métalliques dans les impuretés complique la compréhension du phénomène de formation des phases vitreuses, mais abaisse généralement leur température de formation.

Les oxydes de fer favorisent la formation et le développement des phases vitreuses ; les oxydes de calcium et de magnésium ont une influence plus mitigée et d'autres sont particulièrement néfastes, notamment l'oxyde de sodium qui est considéré comme fondant.

Dans le cas des céramiques silicatées, les liquides formés sont généralement trop visqueux pour conduire à une densification régie par les mécanismes responsables du frittage en phase liquide. C'est le mécanisme du frittage par flux visqueux qui permet le mieux de décrire la densification des matériaux argileux. Proposé par plusieurs modèles dans la littérature, ce mécanisme est prépondérant lorsque la viscosité du flux est importante ($> 10^5 \text{dPa.s}$). L'évolution de la microstructure est alors essentiellement contrôlée par la lente redistribution de la phase visqueuse dans les pores sous l'effet des gradients de pression générés par les courbures entre les grains. La cinétique est donc sensible à la quantité et la viscosité du flux, paramètres qui dépendent, notamment, de la morphologie et de la composition des matières premières et du cycle thermique utilisé (FRENKEL J., 1945 ; SCHERER G.W., BACHMAN D.L., 1977 ; PRADO M.O., ZANOTTO E.D., 2002 ; PIALY P., 2009).

II.4.2.5.3.5. Autres transformations

Selon la composition chimique et minéralogique du matériau argileux de base, d'autres transformations peuvent se produire lors de la cuisson à partir de 700°C. C'est le cas notamment de (JOURDAIN A., 1966 ; CERATEC, 1987 et 1997 ; LECOMTE G. 2004 ; EL YAKOUBI N., 2006):

- la décomposition des carbonates : $\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- l'oxydation de FeO : $\text{FeO} \longrightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$
- la décomposition des sulfates : $2\text{FeSO}_4 \longrightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SO}_2 + \text{SO}_3$
- la décomposition des nitrates : $2\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 \longrightarrow 2\text{PbO} + 4\text{NO}_2 + \text{O}_2$
- la transformation de la muscovite en mullite qui s'accompagne du verre silicaté potassique.

Le dégagement du gaz carbonique provoque une perte de poids très sensible. La chaux libérée lors de la décarbonatation se combine avec les autres éléments pour former de silicates et silico-aluminates de chaux. Les variations pondérales sont alors faibles ou nulles.

Les argiles non calcaires, sous l'effet de leurs éléments fondants, accusent un grésage d'autant plus progressif que l'argile est plus riche en éléments inertes. Ce grésage entraîne bien sûr un retrait mais la perte de poids est peu sensible (faible variation due à la décomposition d'impuretés, sulfates par exemple).

II.4.2.6. Opérations post-cuisson

A la fin de la cuisson, plusieurs opérations peuvent être employées ; elles constituent la finition des produits. Il peut s'agir de l'usinage (meulage, perçage et sciage), du polissage, de l'enrichissement au carbone et du triage.

Après élimination des produits non vendables (produits voilés, fendus, incuits,...), les éléments subissent des contrôles de qualité et de calibrage afin de les classer en plusieurs choix selon la destination. Leur stockage se fait en piles de produits de même choix en nombre déterminé pour faciliter le comptage et de plus en plus sur palettes en bois en plein air ou sous hangars. On utilise des chariots élévateurs pour l'empilage et le chargement sur wagon ou camion.

Des normes de contrôle de qualité des propriétés technologiques des produits fabriqués existent sur chacune des branches de la céramique.

La plupart des secteurs de l'industrie céramique recyclent les matériaux tels que les déchets de coupe, les chutes et les articles non-conformes, en les renvoyant à l'étape de préparation des matières premières.

II.5. Conclusions partielles

Les minéraux argileux comptent parmi les substances minérales industrielles les plus abondantes et les plus sollicitées de nos jours. Chaque groupe minéralogique se caractérise par une structure particulière en couches avec divers matériels remplissant l'espace interfoliaire. Les trois principales structures sont :

- les minéraux 1/1 ou T-O avec un espace basal de 7Å (kaolinite) ;
- les minéraux 2/1 ou T-O-T avec un espace basal très variant : 9,5Å pour le talc et la pyrophyllite ; 10Å pour l'illite et l'halloysite ; 10,4Å pour la palygorskite ; 12Å pour la sépiolite et de 14 à 15Å pour les smectites et les vermiculites ;
- les minéraux 2/1/1 ou T-O-T-O avec un espace basal de 14Å (chlorite).

En plus des minéraux argileux phylliteux, fibreux et interstratifiés, les argiles naturelles renferment, dans la plupart des cas, plusieurs impuretés. Il s'agit essentiellement des matières organiques, des gels des minéraux (ferrifères, alumineux, siliceux), des composés du manganèse et des carbonates qui peuvent être cristallisés ou amorphes. Les hydroxydes en particulier cimentent les argiles et les transforment en agrégats. La présence de ces impuretés peut modifier les propriétés physico-chimiques des argiles. Du point de vue économique, ces substances sont disponibles et présentent des multiples propriétés physico-chimiques qui justifient leur rôle important dans plusieurs secteurs de l'industrie (céramique, papetière, cimenterie, cosmétique, métallurgie, pharmacologie, agroalimentaire, pétrolière, ...) ou dans la protection de l'environnement.

Les matériaux argileux constituent donc des matières premières de base dans la fabrication des produits céramiques manufacturés dont les principaux secteurs sont: les briques et les tuiles ; les carreaux pour sols et murs ; la céramique ornementale ou domestique ; les produits réfractaires ; les appareils sanitaires ; les céramiques techniques (isolants, condensateurs, filtres, produits biomédicaux,...) ; les tuyaux en grès ; les granulats d'argile expansée et les abrasifs inorganiques.

En technologie céramique, les argiles employées doivent répondre aux exigences granulométriques, chimiques et/ou minéralogiques afin d'obtenir des produits de bonne qualité. Les argiles kaolinitiques par exemple sont recherchées du fait de leurs propriétés assez bien connues, leur plasticité appréciable, leur faible retrait au séchage, l'absence de gonflement interfoliaire et la coloration peu marquée des tessons. D'autres substances naturelles non argileuses ou synthétiques et des adjuvants (additifs) divers mais bien dosés sont actuellement utilisées dans les procédés de fabrication de certains produits céramiques.

Malgré l'existence de la diversité des produits céramiques, les procédés de fabrication industrielle sont très similaires et comprennent les opérations de : préparation, façonnage, séchage, traitements de surface et décorations éventuels ainsi que la cuisson (frittage). La cuisson demeure une opération délicate et fondamentale car elle confère aux produits finis leurs caractéristiques définitives et leurs plus ou moins bonnes aptitudes à l'emploi. C'est au cours de ce procédé que se forment des nouveaux composés cristallins et des phases vitreuses.

La loi minière congolaise a classé les produits de carrières en minéraux industriels et en matériaux de construction à usage courant. Présentée de cette façon, cette différence entre les deux groupes des substances minérales naturelles peut amener des confusions surtout auprès des investisseurs potentiels. Des appellations comme « calcaire à moellon, argiles à brique, calcaire à ciment » devraient être évitées. Il est donc souhaitable que les deux groupes de produits de carrières appartiennent à un seul ensemble : «substances minérales industrielles ».

CHAPITRE III: TRAVAUX DE TERRAIN

III.1. Introduction

Sur base de l'analyse de la documentation disponible, les sites d'exploitation artisanale ou industrielle des matériaux argileux ont été inventoriés dans les environs de Kinshasa. Sur le terrain, les travaux ont consisté :

- à la cartographie des sites d'exploitation des matériaux argileux à Kinshasa et environs ;
- à la description lithostratigraphique des roches argileuses ;
- à l'échantillonnage assez représentatif des différents lithofaciès argileux ;
- au forage manuel ou à la tarière de puits afin de se procurer des échantillons peu ou non altérés ;
- aux observations géo-environnementales des sites exploités ;
- à la prise des contacts et aux échanges avec les artisans, les petits et les grands entrepreneurs actifs qui utilisent les matériaux argileux pour diverses fins ainsi qu'aux autorités administratives et/ou minières locales.

L'intégration des données de terrain a permis de sélectionner deux des sites d'exploitation sur lesquels l'essentiel des travaux de caractérisations et de valorisations en laboratoires a été réalisé.

III.2. Matériels utilisés sur terrain

Les principaux matériels ou documents utilisés pour l'exécution des travaux de terrain sont notamment :

- une jeep 4x4 tout terrain ;
- un GPS Garmin Colorado 300 ;
- des pioches et des pelles ;
- des boussoles et marteaux de Géologues ;
- une tarière ;
- un appareil photo numérique ;
- des sachets en plastique ;
- un double décimètre ;
- des réactifs dont HCl dilué à 10% ;
- des marqueurs ;
- un carnet de terrain ;
- une carte géologique et une carte topographique de Kinshasa et environs.

III.3. Sites d'exploitation des matériaux argileux

Le tableau n°23 et la figure 19 présentent les six sites de gisements de matériaux argileux inventoriés à Kinshasa et environs.

Tableau 23: Sites d'échantillonnage des matériaux argileux

Sites	Carrières/Puits	Code échantillons	Coordonnées géographiques
Kingabwa	Salongo-003	KiS ₃ C-2 KiS ₃ C-3 KiS ₃ C-4	S04°20'32,11'' E015°21'32,2'' 277m
	Salongo-004	KiS ₄ C-2 KiS ₄ C-3 KiS ₄ C-4	S04°20'41,1'' E015°21'22,5'' 287m
	Salongo-005	KiS ₅ 2A KiS ₅ 2B KiS ₅ C-3 KiS ₅ C-4	S04°20'45,3'' E015°21'26'' 281m
	Ndjili-006	KiND ₆ C-2 KiND ₆ C-3	S04°20'59,4'' E015°21'42,7'' 276m
	Ndjili-007	KiND ₇ C-2	S04°20'57,1'' E015°21'44,1'' 281m
	Ndjili-008	KiND ₈ C-2	S04°20'55,1'' E015°21'40,5'' 279m
	MBE	KiMBC-1 KiMBC-2	S04°20'53,3'' E015°21'33,7'' 278m
	Idi Amin-010	KiDA ₁₀ C-2 KiDA ₁₀ C-3	S04°20'47'' E015°21'26'' 280m
	Idi Amin-011	KiDA ₁₁ C-2 KiDA ₁₁ C-3	S04°20'44,9'' E015°21'29,3'' 274m
Kasangulu	Nsaya-1	KaN ₁ C-2 KaN ₁ C-3	S04°35'44'' E015°09'42,4'' 398m
	Nsaya-2	KaN ₂ C-2 KaN ₂ C-3	S04°35'41,6'' E015°09'45'' 392m
	NIFE	KaN _i C-2 KaN _i C-3	S04°35'53,1'' E015°10'03,6'' 400m

	Suisse	KaSSC-2	S04°35'02,3" E015°11'05,8" 378m
	Salongo	KaSC-2 KaSC-3	S04°35'17,4" E015°09'52,9" 406m
	SGI	KaSGIC-2 KaSGIRs KaSGIRa KaSGIRb	S04°34'49,7" E015°11'48,1" 367m
Ndjili Cecomaf	Coco-1	NC ₁ C-2 NC ₁ C-3	S04°24'31" E015°22'25" 291m
	Coco-2	NC ₂ C-1 NC ₂ C-2 NC ₂ C-3 NC ₂ C-4	S04°24'38" E015°22'01" 291m
Lemba Imbu	Mavuba	LIMC-2 LIMC-3	S04°26'45,6" E015°20'56,9" 306m
	Kimwenza	LIKC-2 LIKC-3	S04°26'35,3" E015°21'06,9" 302m
	Vallée Maraîchère	LIVMC-2 LIVMC-3	S04°26'39,1" E015°21'21,9" 281m
BRIKIN	BRIKIN	BKINC-2	S04°20'44,3" E015°13'04,6" 287m
Lutendele	Lute-01	LT ₁ C-2 LT ₁ C-3	S04°23'14,7" E015°10'57,6" 262m
	Lute-02	LT ₂ C-2 LT ₂ C-3	S04°23'11,8" E015°10'59,8" 259m
	Lute-03	LT ₃ C-2 LT ₃ C-3	S04°23'08,6" E015°11'04,7" 264m
	Lute-04	LT ₄ C-2A LT ₄ C-2B LT ₄ C-3	S04°23'10,1" E015°11'07,1" 263m

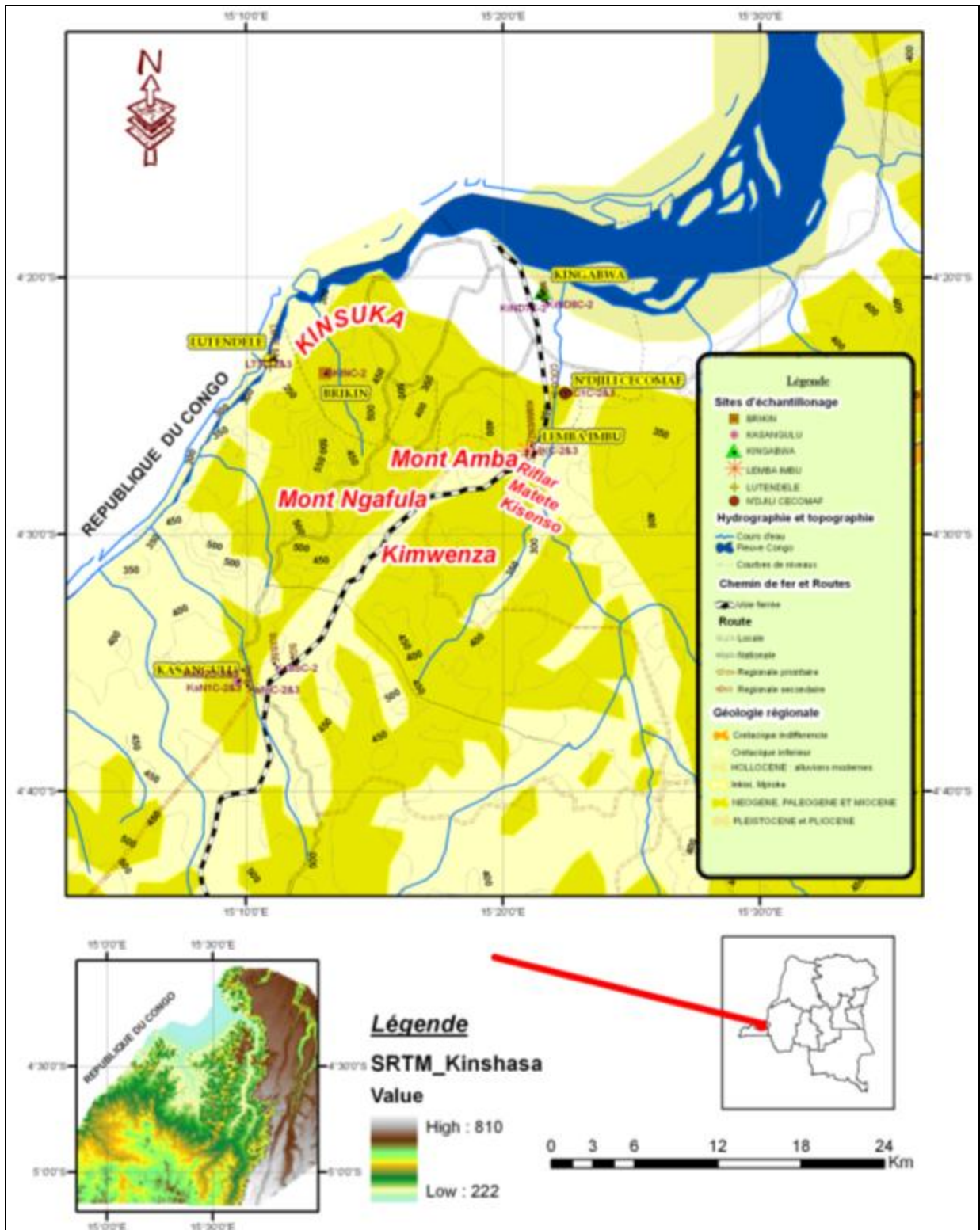


Fig. 19: Localisation des sites d'échantillonnage des matériaux argileux

III.3.1. Site de Kingabwa

III.3.1.1. Présentation et observations géo-environnementales

Kingabwa est un des quartiers de l'une des communes, Limite, de la ville province de Kinsahasa en RD Congo. Il est limité au nord-est par le fleuve Congo, à l'ouest par la rivière Kalamu et à l'est par les rues Bosuka et Bokele. Cet ancien village des autochtones « Teke », le quartier Kingabwa longe la rivière Ndjili jusqu'au Pool Malebo (non loin de là où elle se jette dans le fleuve Congo) et constitue une zone marécageuse de basse altitude tournant autour de 280m. Il est donc parcouru par des filets d'eau (dont les rivières Ngwele, Ndjili, Kalamu,...) qui prennent leur source aux pieds des surfaces environnantes surélevées et habitées.

Sa population est estimée à 33.357 habitants répartie en sept localités : Ebale Congo, Moleko, Kwamataba, Madrandele, Pêcheurs, Britano et Nzeze (communément appelée Yaounde).

L'exploitation des argiles aurait, selon les petits entrepreneurs locaux, commencé vers les années 1955 par les colonisateurs Belges (surnommé à juste titre de « Mundele » par les autochtones) qui furent propriétaires de la concession contenant les argiles à Kingabwa-Yaounde.

A la suite des pillages de 1991-1992 qui ont grandement perturbé la situation socio-économique du pays, les habitants de Kingabwa se sont livrés, pour des raisons de survie, à l'exploitation en carrières artisanales des argiles déjà entamée par les colonisateurs. Cette exploitation artisanale qui fait recourir aux outils rudimentaires de production se réalise dans des parcelles d'habitation, parfois à l'intérieur des maisons, dans les avenues et en pleine culture.

A ce jour, force est de constater qu'après exploitation, aucun site n'est réhabilité. Si les puits de petite dimension sont remplis d'ordures ménagères ou d'immondices divers, ceux de grande dimension sont abandonnés et constituent:

- soit des trous béants et/ou des lacs dans lesquels les enfants vont passer certains moments de leur loisir ;
- soit des décharges finales de ce quartier rendant ainsi l'environnement mal sain.

Ces formes de dégradation de l'environnement occasionnent finalement la perte d'esthétique du quartier (Fig.20).



Fig. 20: Quelques anciens puits d'exploitation artisanale d'argile remplis d'eau

III.3.1.2. Description des puits d'échantillonnage

Dans ce site, l'échantillonnage a été réalisé dans cinq puits forés avec la tarière manuelle (Ndjili-006, 007 et 008 ; Idi Amin 10 et 11) et dans quatre puits ouverts à l'exploitation artisanale (Salongo-003, 004 et 005 ; MBE).

Toutefois il y a lieu de noter que les puits Ndjili sont localisés dans une zone maraîchère, tandis que le puits Salongo-003 est creusé dans un salon d'une maison d'habitation pour récupérer de l'argile.

La figure 21 présente quelques points d'échantillonnage des matériaux argileux de Kingabwa ; les coupes de tous les ouvrages, les puits forés, sont données dans les figures n°22 à 29.



Fig. 21: Vue de quelques points d'échantillonnage à Kingabwa

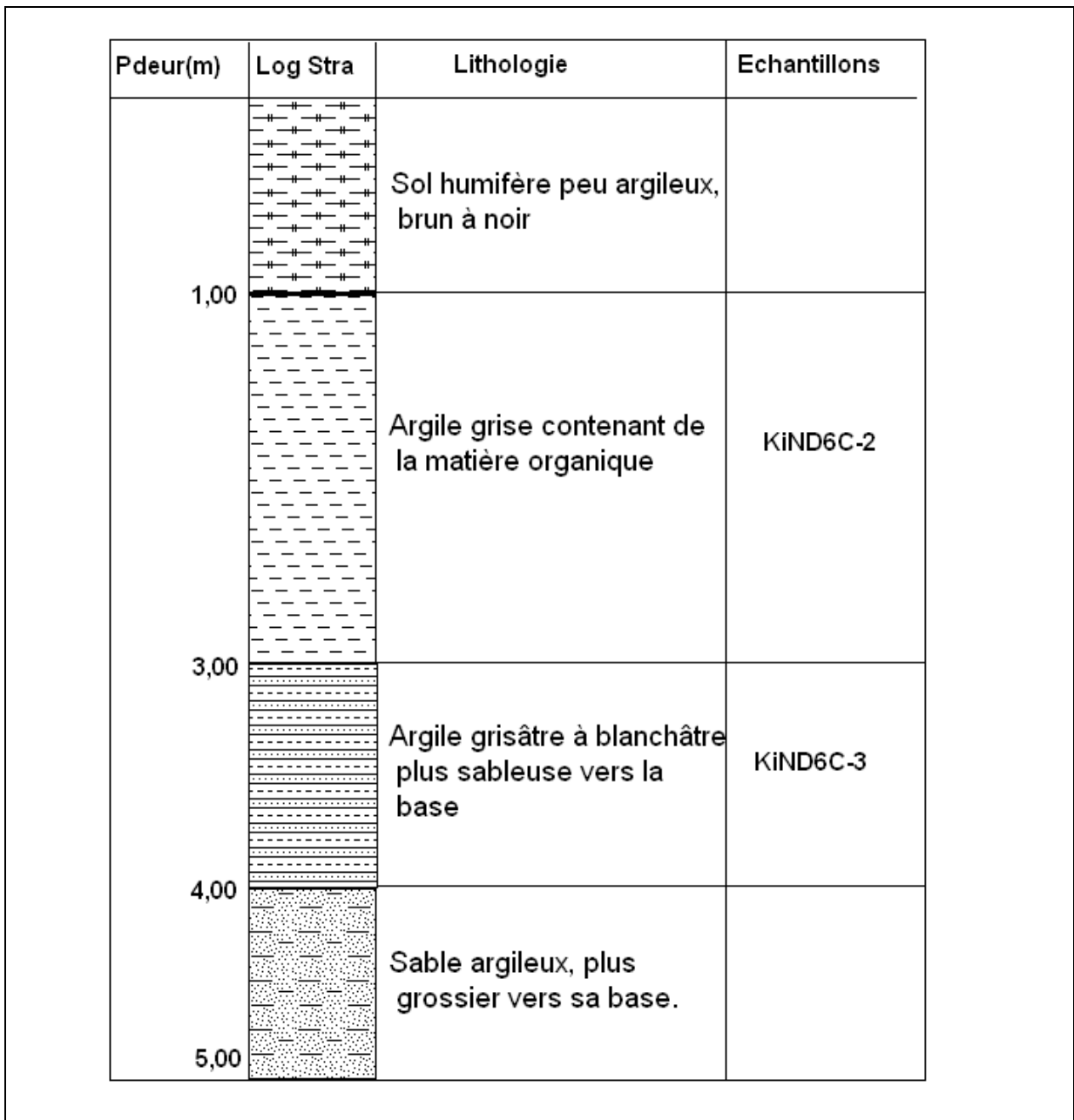


Fig. 22: Coupe du puits Ndjili-006 à Kingabwa

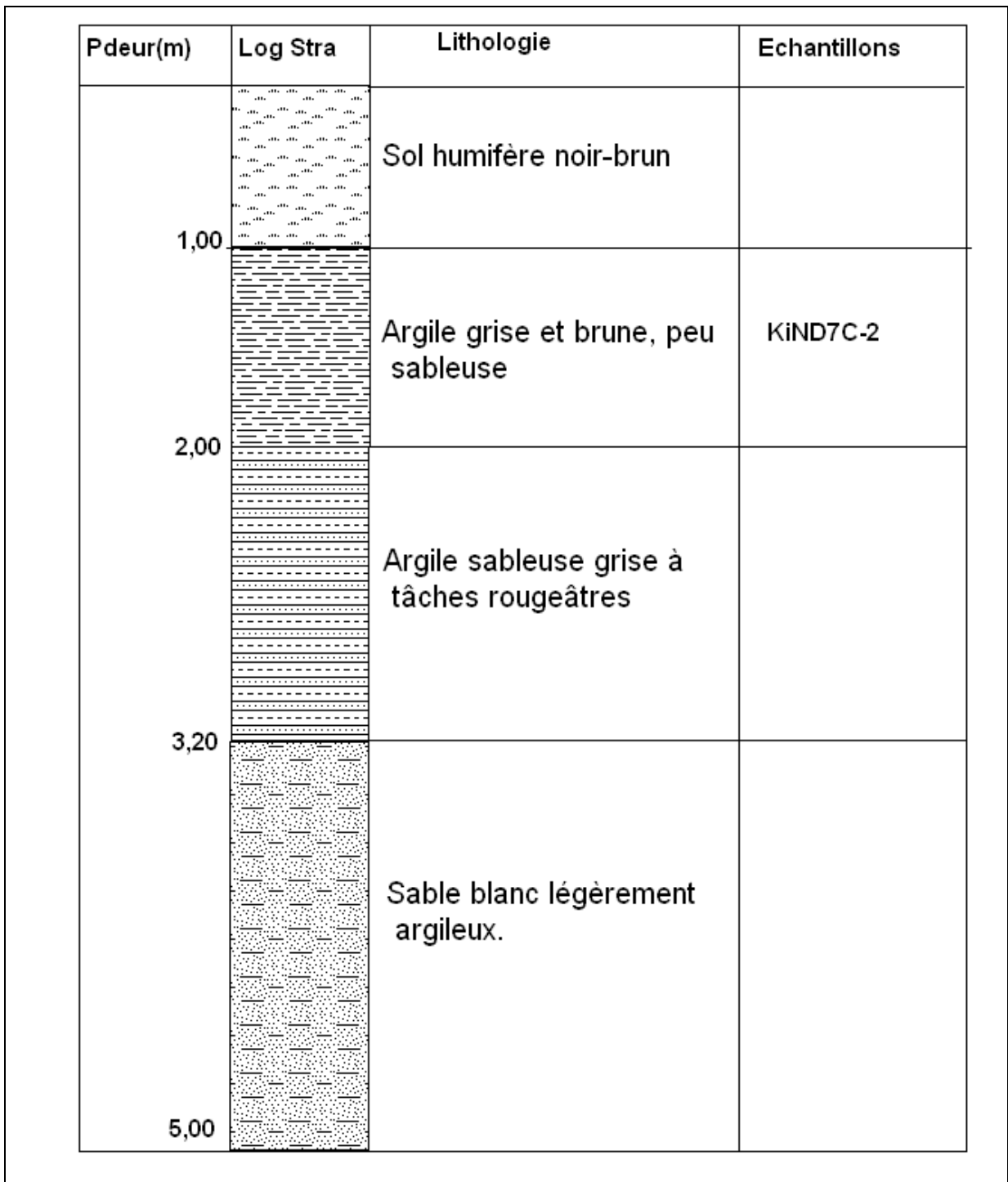


Fig. 23: Coupe du puits Ndjili-007 à Kingabwa


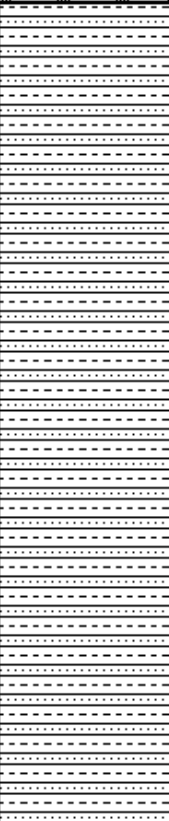
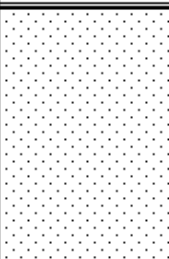
Pdeur(m)	Log Stra	Lithologie	Echantillons
0,60		Sol humifère argileux, gris-clair et contenant des racines d'herbes	
		Argile grise à blanchâtre souvent teintée de noir ou de rouge, des passées sableuses s'observent au sein de la masse argileuse	KIND8C-2
3,00		Sable blanchâtre à jaunâtre peu ou pas argileux.	
4,00			

Fig. 24: Coupe du puits Ndjili-008 à Kingabwa

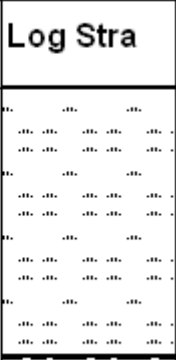
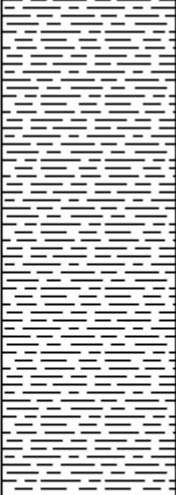
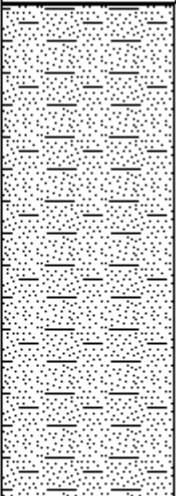
Pdeur(m)	Log Stra	Lithologie	Echantillons
1,00		Sol humifère peu argileux	
3,00		Argile noirâtre contenant quelques grains de sable fin	KiDA10C-2 KiDA11C-2
5,00		Sable brunâtre légèrement argileux dans sa partie sommitale.	KiDA10C-3 KiDA11C-3

Fig. 25: Coupe des puits IDI AMIN-10 et 11 à Kingabwa

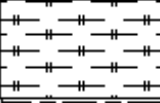
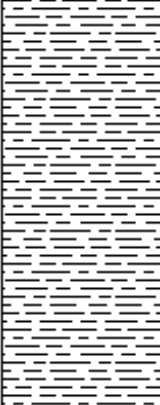

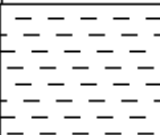
Pdeur(m)	Log Strat	Lithologie	Echantillons
0,25		Sol argileux humifère noirâtre à grisâtre	
1,20		Argile blanche nuancée de jaune pâle, légère- ment sableuse	KiS3C-2
2,40		Argile blanchâtre, riche en sable	KiS3C-3
3,00		Argile blanche et teintée de jaune, grasse et com- pacte.	KiS3C-4

Fig. 26: Coupe du puits Salongo-003 à Kingabwa


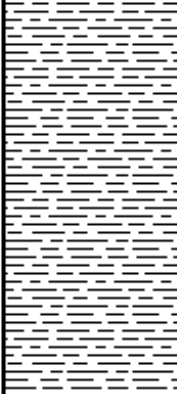
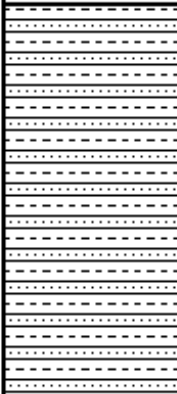
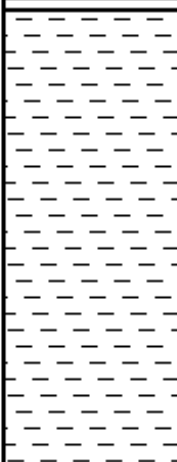
Pdeur(m)	Log Stra	Lithologie	Echantillons
0,25		Sol humifère noir à grisâtre	
1,25		Argile blanchâtre peu sableuse	KiS4C-2
2,20		Argile riche en sable localement lenticulaire et contenant de la matière organique noirâtre	KiS4C-3
3,40		Argile blanche, grasse, compacte et trop humide.	KiS4C-4

Fig. 27: Coupe du puits Salongo-004 à Kingabwa

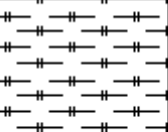
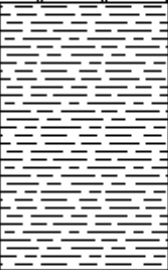
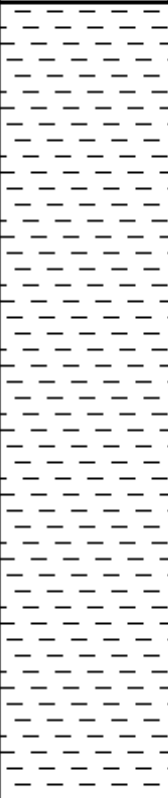
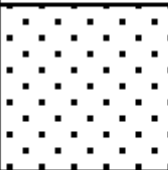
Pdeur(m)	Log Strat	Lithologie	Echantillons
0,60		Sol argileux humifère noir-gris	
1,80		Argile blanche nuancée de jaune pâle, localement à sable trop fin	KiS52A
5,60		Argile blanchâtre très compacte, grasse et légè- rement teintée de rouge	KiS52B KiS5C-4
5,85		Sable gris-noirâtre, de plus en plus clair vers la base.	

Fig. 28: Coupe du puits Salongo-005 à Kingabwa

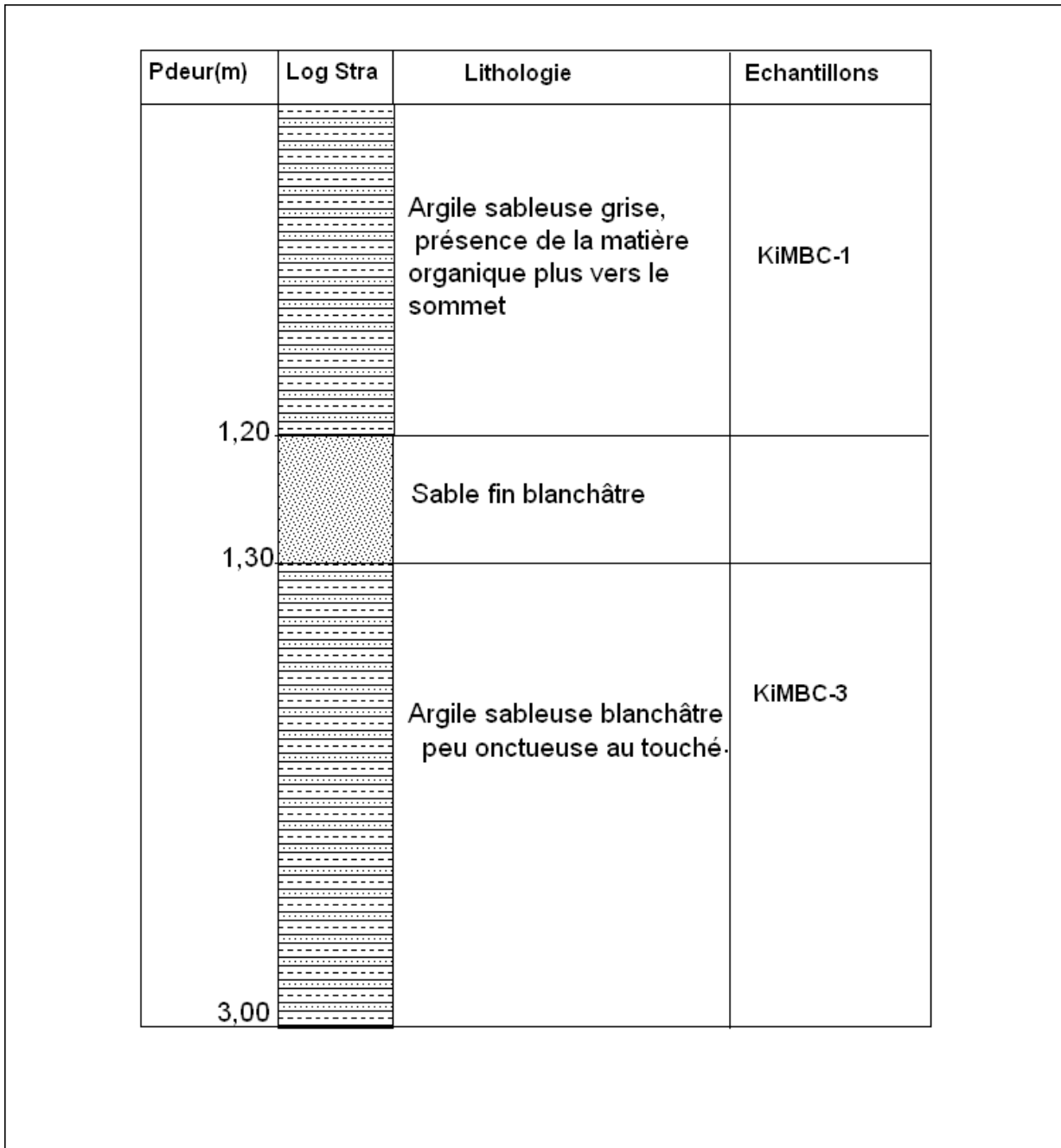


Fig. 29: Coupe du puits MBE à Kingabwa

III.3.1.3. Exploitation et usages des argiles de Kingabwa

A Kingabwa, les argiles sont exploitées en carrières et commercialisées de façon artisanale par les habitants de ce quartier selon les étapes suivantes (Fig.30) :

- creusement des puits **(1)** ;
- réalisation des mélanges argile-eau **(2)** ;
- fabrication des baguettes de dimensions différentes **(3)** ;
- séchage à l'air libre et/ou cuisson à l'aide des morceaux de bois **(4)** ;
- mise en tas dans des cartons ou dans des seaux **(5)** ;
- commercialisation **(6)** locale ou à l'étranger (Congo-Brazza, Angola, Gabon).

Localement, les argiles de Kingabwa sont vendues aux mamans (surtout enceintes) pour la consommation (« Mabele ») et à la société de bouteillerie de Kinshasa (BOUKIN), unique en matière de fabrication des bouteilles à Kinshasa, et aux pharmaciens pour la fabrication des produits anti-diarrhéiques ou luttant contre les troubles digestifs. Une faible quantité de leur production est utilisée par les exploitants eux-mêmes pour la fabrication des briques crues en vue de la construction de leurs petites maisons.

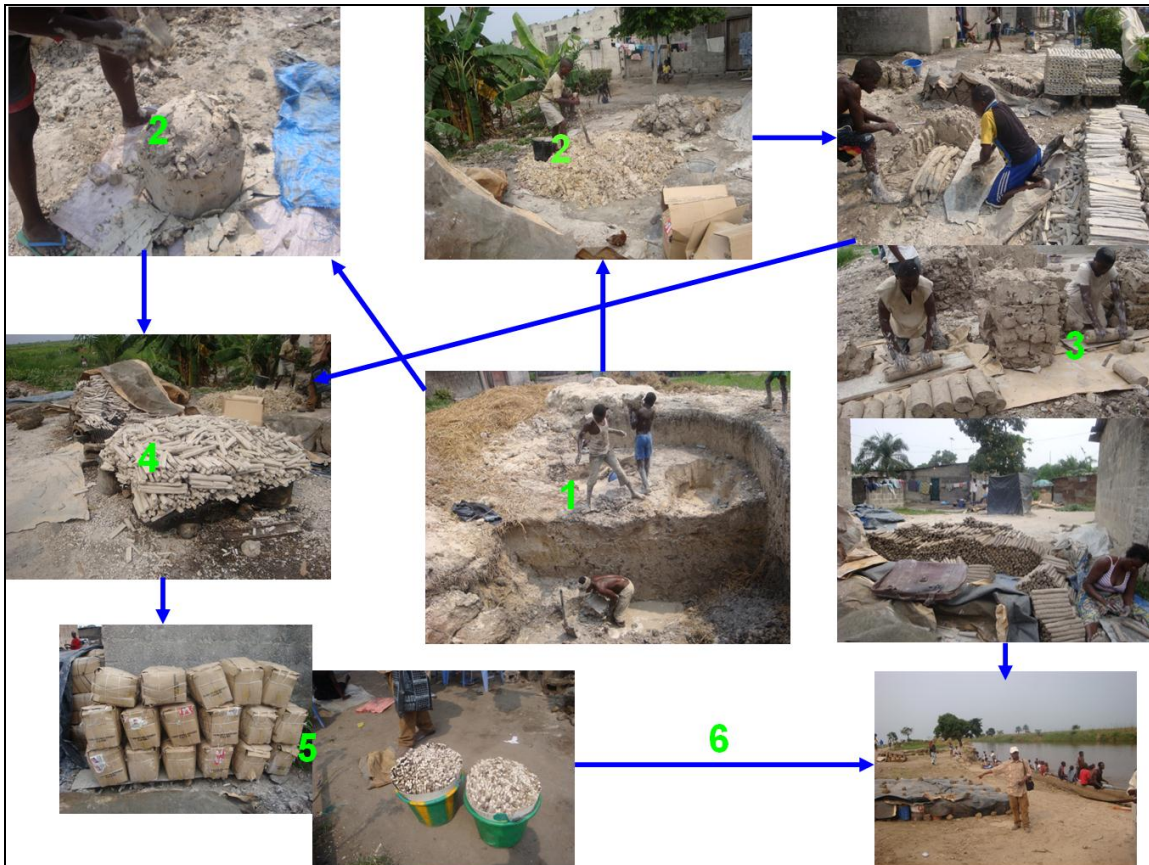


Fig. 30: Exploitation et commercialisation artisanales des argiles de Kingabwa

Durant l'année 2005, vingt exploitants congolais (17 hommes et 3 femmes) de ces matériaux ont réalisé, sur une superficie d'environ 1.165 m², une production totale de 8.150,40 tonnes d'argiles réparties comme suit :

- 3.888 tonnes vendues sur le marché de Kinshasa ;
- 1.994,40 tonnes et 2.268 tonnes respectivement sur les marchés de Brazzaville et d'Angola.

Sans payer les impôts, ces artisans ont gagné des revenus estimés à 666.302,4\$ dont 104.986,80\$ à Kinshasa, 145.591,20\$ sur le marché de Brazzaville et 415.724,40\$ sur le marché d'Angola (LUBOYA K., 2007).

III.3.2. Sites de Lemba Imbu et de Ndjili Cecomaf

III.3.2.1. Présentation et observations géo-environnementales

Ces deux sites se localisent le long de la rivière Ndjili, au sud de celui de Kingabwa : le premier, Lemba Imbu, sur la rive gauche au niveau de Kisenso et le second, Ndjili Cecomaf, sur la rive droite.

Les formations géologiques holocènes et de basses terrasses observables dans la vallée de Ndjili sont sujettes à des cultures vivrières et maraîchères, œuvre des populations environnantes communément appelées « les mamans maraîchères ».

Les matériaux argileux de cette vallée de la Ndjili sont exploités en carrières et de manière artisanale pour :

- la production des briques crues et cuites dans des fours de capacité allant jusqu'à 2500 briques (Coco-2) par l'énergie de bois achetés. Si une partie des briques fabriquées sert à la construction des maisonnettes des exploitants (Fig.31), une autre est vendue;
- la vente, à l'état brut, aux boulangers (utilisation dans leurs fours) et à la société de bouteillerie de Kinshasa (BOUKIN) ;
- la fabrication des objets d'arts par les étudiants de l'Académie des Beaux Arts.



Fig. 31: Une maisonnette de Lemba Imbu à base des matériaux d'un puits environnant

A la fin de l'exploitation, certains puits, surtout ceux situés en plein champ des légumes, sont remblayés alors que d'autres sont laissés à découvert (Fig.32).

Des exploitations de sables par des artisans ou par des sociétés de construction de Kinshasa ont été aussi observées dans cette vallée.



Fig. 32: Puits d'exploitation artisanale d'argile à Ndjili Cecomaf

Une étude de reconnaissance par sondages a été menée en 1989 par une équipe de chercheurs du CRGM dans la zone comprise entre les méridiens 15°17'53" et 15°17'23" de longitude Est et le parallèles 4°24'20" et 4°25'50" de latitude Sud et située dans la vallée de la Ndjili à Kisenso non loin de la gare de Lemba (TSHIKA M. et al., 1989). Deux gisements d'argiles kaoliniques ont été identifiés dont l'un a donné 22.400 tonnes et l'autre 24.500 tonnes d'argiles pour un réseau de huit carrés de 50mx50m, soit une superficie de 20.000m² chacun.

III.3.2.2. Description des puits d'échantillonnage

A Lemba Imbu et à Ndjili Cecomaf, les matériaux argileux sont extraits de cinq puits d'exploitation artisanale (Fig.33 à 35).

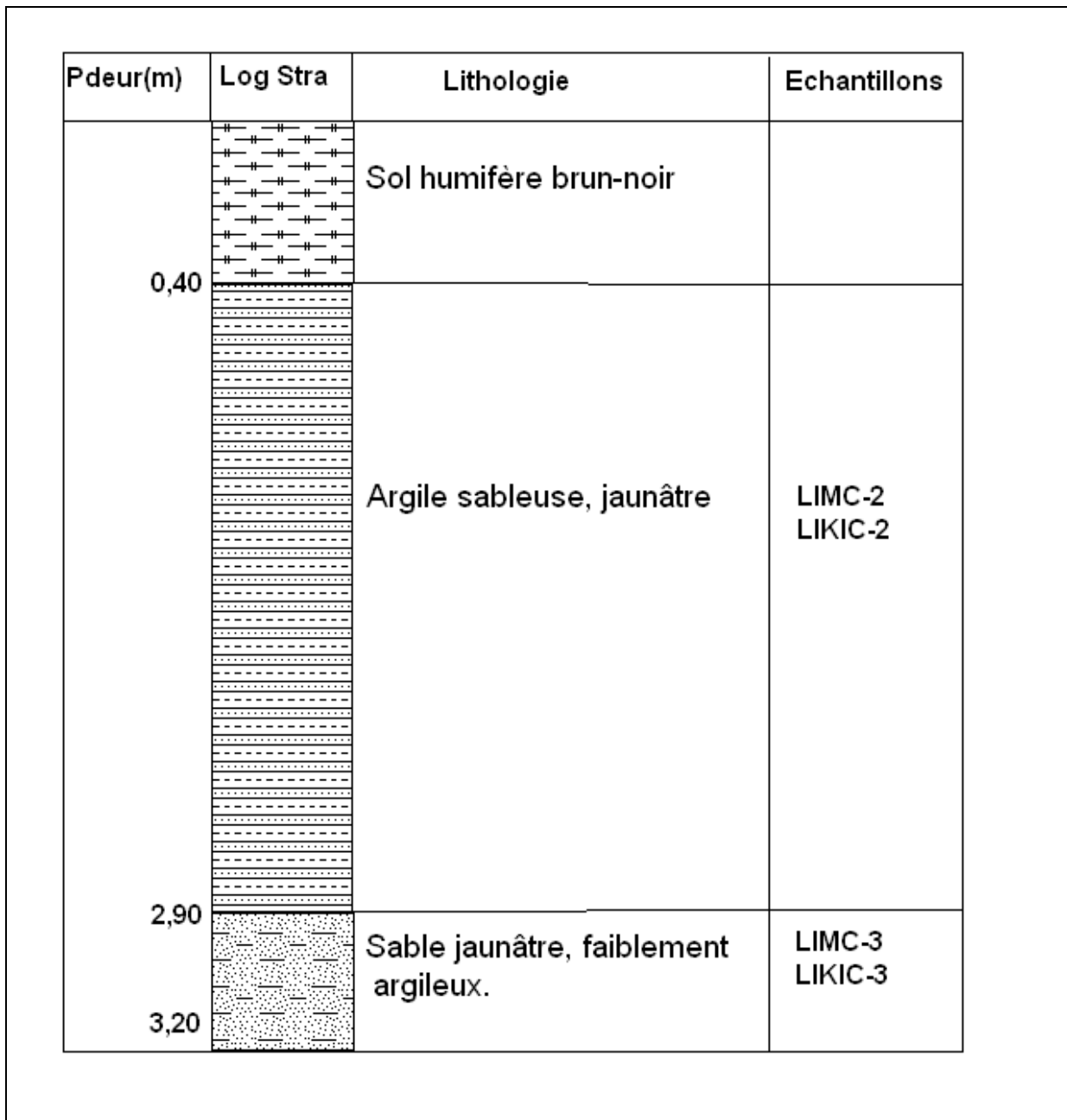


Fig. 33: Coupe des puits Mavuba et Kimwenza à Lemba Imbu

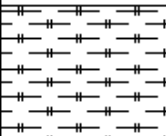
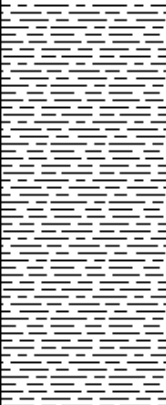
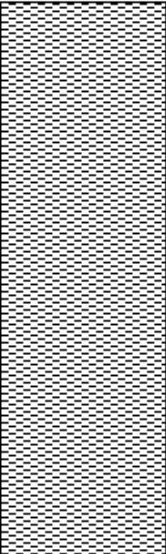

Pdeur(m)	Log Strat	Lithologie	Echantillons
0,60		Sol humifère noir (C-1)	NC1C-1
2,15		Argile jaunâtre, plus jaunâtre vers le sommet, compacte	NC1C-2 NC2C-2
4,15		Argile sableuse blanche à tâches jaunes	NC1C-3 NC2C-3
4,30		Sable blanc, moyen à grossier.	NC2C-4

Fig. 34: Coupe des puits Coco-1 et Coco-2 à Ndjili Cecomaf

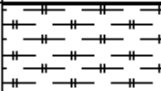
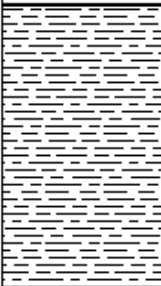
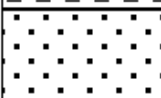
Pdeur(m)	Log Stra	Lithologie	Echantillons
0,02		Sol argileux, humifère, noirâtre	
0,35		Argile noire, grise, compacte	LIVMC-2
2,30		Argile blanche, tachetée de jaune, compacte et grasse	LIVMC-3
2,50		Sable jaunâtre, de plus en plus blanc vers la base.	

Fig. 35: Coupe du puits de la vallée maraîchère à Lemba Imbu

III.3.3. Site de Kasangulu

III.3.3.1. Présentation et observations géo-environnementales

Créée par Ordonnance-Loi n°87-232 du 29 juin 1997, la cité de Kasangulu, dans la province du Bas-Congo, fait partie du Territoire portant le même nom. Elle est située entre 4°35' de latitude Sud et 15°10' de longitude Est sur une aire de 85Km² à plus ou moins 34 Km de la ville province de Kinshasa sur la Nationale n° 1 et compte environ 28.166 habitants (Rapport annuel du Territoire de Kasangulu, 2006).

Cette cité est composée de cinq quartiers qui sont limités entre eux par des cours d'eau et par la Nationale n°1 : Mawete, Mampuya, Mvula Nene, Luzamba et Ngambi.

Comme pour l'ensemble du territoire, la cité de Kasangulu est constituée d'une succession des collines d'altitudes allant jusqu'à 537 m (Mont Kimbela au nord de la cité) aux versants en pentes fortes ou moyennes. Les vallées ainsi formées sont en V et drainées, pour les unes, par des ruisseaux permanents dont Mabata, Luzamba et surtout par la rivière Lukaya. Des vallées sèches constituent des ruisseaux temporaires pendant la période de pluies.

Le grès d'Inkisi (et/ou son faciès arkosique rouge) s'observe dans le lit de la rivière Lukaya qui lui imprime, dans le profil longitudinal, des rapides et des petites chutes. Par ses propriétés mécaniques intéressantes, cette roche gréseuse compte parmi les meilleures pour la construction des maisons et des routes. Ce grès fait, actuellement, l'objet d'une exploitation industrielle en carrière par les sociétés de SAFRICAS (depuis 1947), de SGI (Société Générale Industrielle, depuis 2008) et une société chinoise localisée à 3 Km de la cité de Kasangulu pour la production des matériaux de construction de type concassés, granulats de différentes dimensions. D'une capacité d'installation estimée à 400 tonnes par heure, la carrière de SGI (Fig.36) est séparée de celle de SAFRICAS (100 tonnes par heure) par la rivière Mafunfu.

La carrière de SGI a fait l'objet d'un échantillonnage de ses lithofaciès qui sont composés de bas en haut :

- du grès arkosique rougeâtre et tacheté de vert rappelant la chlorite ;
- d'un saprolithe rougeâtre ayant à sa base un niveau bariolé lenticulaire (C-3) ;
- d'un petit horizon de gravillons ferrugineux ;
- d'une argile sableuse jaunâtre communément appelée Terre Jaune (C-2) ;
- d'un sol humifère également jaunâtre.

L'occurrence de ce grès arkosique dans cette carrière permet, à ce stade d'observations, de formuler l'hypothèse de son altération chimique en minéraux argileux kaolinitiques exploités par les artisans. Les résultats des analyses chimiques,

minéralogiques et microscopiques (voir Chap. IV) des échantillons y extraits seront mis en contribution pour infirmer ou affirmer cette hypothèse.



Fig. 36: Une vue de la carrière d'exploitation de grès de SGI à Kasangulu

Sur un sol généralement de couleur brun ou jaunâtre pousse un recru forestier sans cesse coupé comme énergie de bois pour des usages domestiques. A côté des végétations sauvages s'observent, dans les parties humanisées, des arbres fruitiers, des palmiers à huile, des acacias et d'autres plantes utiles. Les cultures vivrières couvrent des faibles espaces essentiellement aux bas-fonds là où la pente est faible.



Fig. 37: Paysage et quelques maisons de la cité de Kasangulu

Deux formes de logement sont observables dans la cité de Kasangulu : l'un public, plus ancien et l'autre individuel, plus récent et fruit de l'auto-construction avec plus de 90% des murs érigés en briques d'argiles crues ou cuites (Fig.37). Les maisons anciennes (à la gare de Kasangulu, missions religieuses, centre commercial, siège de l'administration du territoire,...) sont faites des briques cuites produites localement vers les années 1950 par la briqueterie AERTS établie dans la région à Vindevoghel mais qui n'existe plus aujourd'hui. Il sied de souligner aussi que vers les années 1975, les populations de Kasangulu construisaient leurs maisons plus en pisé qu'en briques cuites. La connaissance des techniques de fabrication artisanale des briques et les injonctions des autorités administratives de ce territoire avaient contribué, par la suite, à la prise des mesures d'amélioration des conditions de l'habitat local. Ainsi, progressivement, les populations de Kasangulu ont remplacé des maisons faites de murs et toits en pailles par celles érigées en briques cuites ou adobes. Et aujourd'hui, les résultats sont palpables car la plus part des maisons individuelles et collectives de cette cité sont construites par des briques cuites ou crues produites à partir de l'argile locale.

A ce jour, bien qu'elle soit une activité saisonnière pour la plupart des exploitants, la briqueterie artisanale de Kasangulu, à cause de ses avantages économiques, est de plus en plus considérée comme un des secteurs prioritaires de ce lieu et mérite

d'être soutenue en vue de l'amélioration de la qualité des produits finis mis sur le marché.

Les exploitants se regroupent généralement en cinq équipes dont les familles, les collègues d'une classe ou fidèles d'une église ou amis de la cité, les ouvriers journaliers, les prisonniers et les groupes d'enfants. L'exploitation des matériaux naturels argileux se fait en carrières et un peu partout, dans les parcelles d'habitation, à côté des rivières ou non loin de la Nationale n°1.

Pour cuire leurs briques, les exploitants se livrent à l'abattage de certains arbres en l'occurrence l'acacia, le manguier, l'avocatier, l'oranger,... dont le choix est dicté par le potentiel énergétique (pas ou peu de fumée), la distance par rapport à la briqueterie et le coût ou le prix fixé par l'autorité environnementale du territoire ou le propriétaire indépendant (Fig.38 et 39).



Fig. 38: Vue partielle d'une briqueterie artisanale de Nsaya à Kasangulu



Fig. 39: Abattage d'arbres au bord de la rivière Lukaya à Kasangulu

A la fin de l'exploitation, les puits sont laissés à découvert, les sites ne sont pas remis à leurs états initiaux.

La ville de Kinshasa, capitale de la RD Congo, et certaines villes ou cités de l'intérieur de la province du Bas-Congo (Luila, Lukunga Mputu, Mbanza Ngungu, Kinsatu, Matadi, ...) sont les principales zones de consommation des produits cuits de Kasangulu via la Nationale n°1 et le Chemin de fer.

III.3.3.2. Description des puits d'échantillonnage

L'échantillonnage de matériaux argileux de Kasangulu a été réalisé dans cinq des puits d'exploitation artisanale (Nsaya 1 et 2, Suisse, NIFE et Salongo) et dans une carrière industrielle ouverte en 2008, quelques mois avant notre passage, par la Société Générale Industrielle (SGI). Suisse est un puits ouvert pour produire des briques devant servir à la construction d'une cité en gestation (lieu touristique) sur place. A la fin des travaux, les exploitants ont souligné que les puits seront remblayés par les déblais des carrières de la SGI.

Les figures n°40 à 46 présentent les fronts de taille et les coupes de différents puits d'échantillonnage.



Fig. 40: Fronts de taille de puits d'exploitation artisanale de Nsaya à Kasangulu

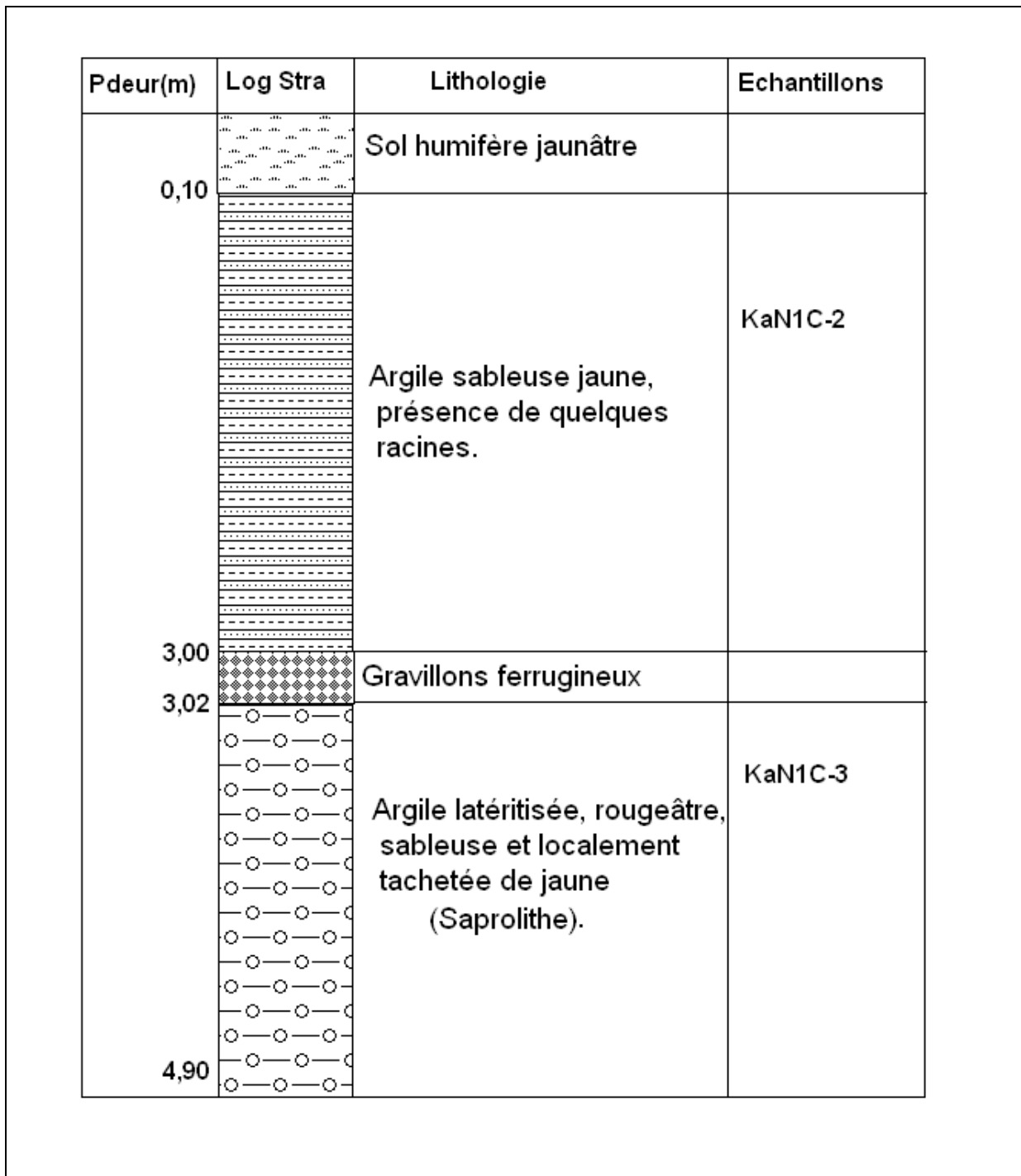


Fig. 41: Coupe du puits Nsaya-1 à Kasangulu




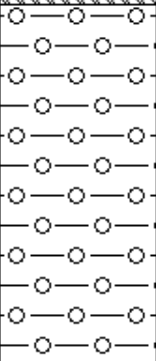
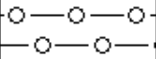
Pdeur(m)	Log Stra	Lithologie	Echantillons
0,09		Sol humifère jaune avec des tâches noires	
		Argile sableuse jaune contenant des racines.	KaN2C-2
2,80		Gravillons ferrugineux	
2,83		Argile latéritisée rougeâtre conférant à la masse un aspect granulaire (Saprolithe).	KaN2C-3
5,00			

Fig. 42: Coupe du puits Nsaya-2 à Kasangulu

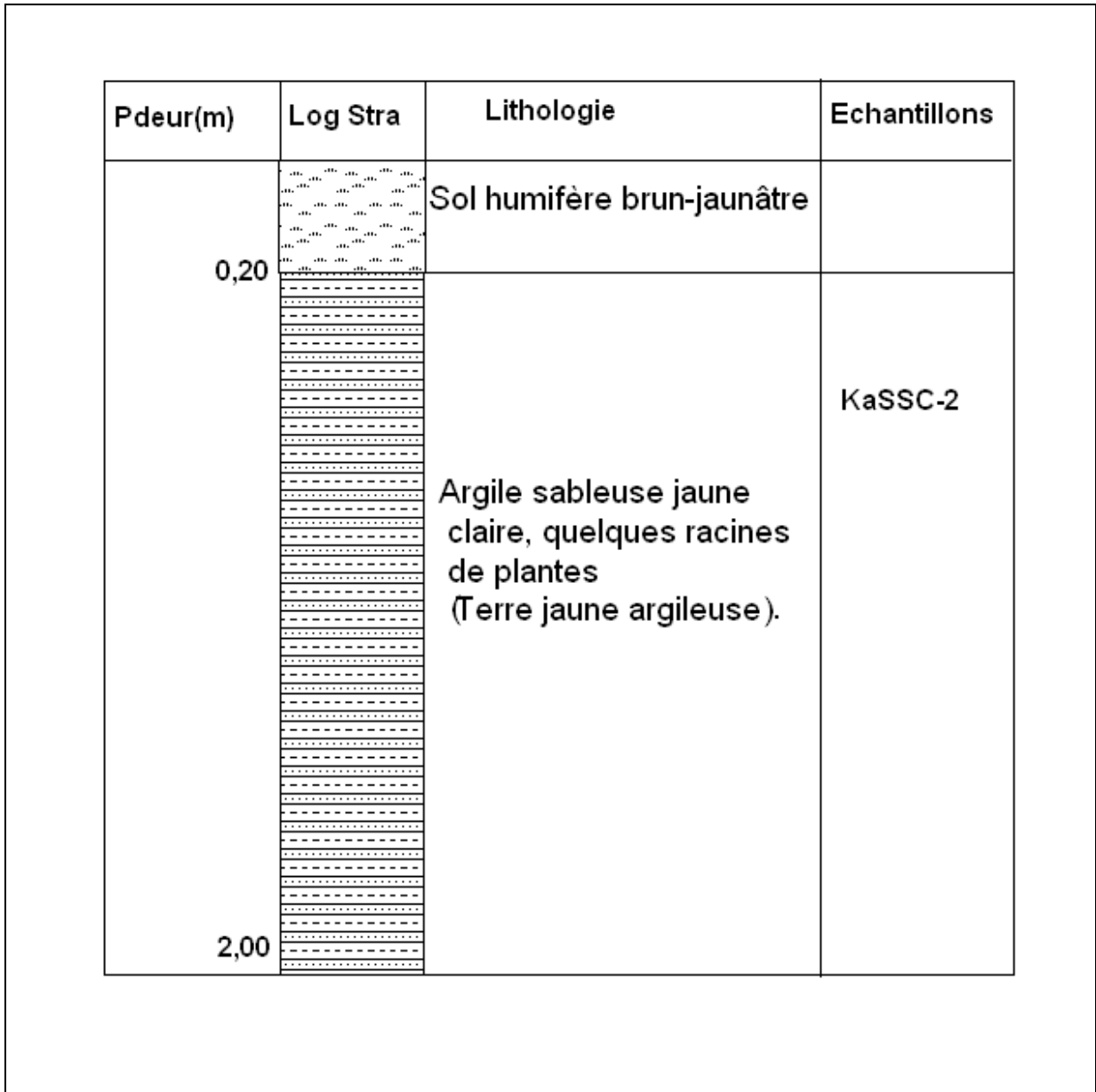


Fig. 43: Coupe du puits Suisse à Kasangulu


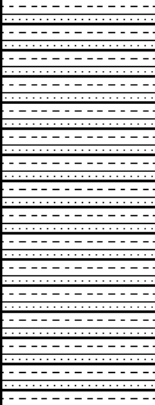
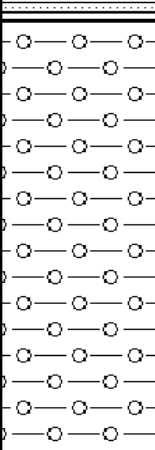
Pdeur(m)	Log Stra	Lithologie	Echantillons
0,15		Sol humifère brunâtre à grisâtre	
		Argile sableuse jaunâtre	KaNiC-2
2,30		Argile rougeâtre d'aspect granulaire rappelant des gravillons ferrugineux (Saprolithe).	KiNiC-3
4,40			

Fig. 44: Coupe du puits NIFE à Kasangulu

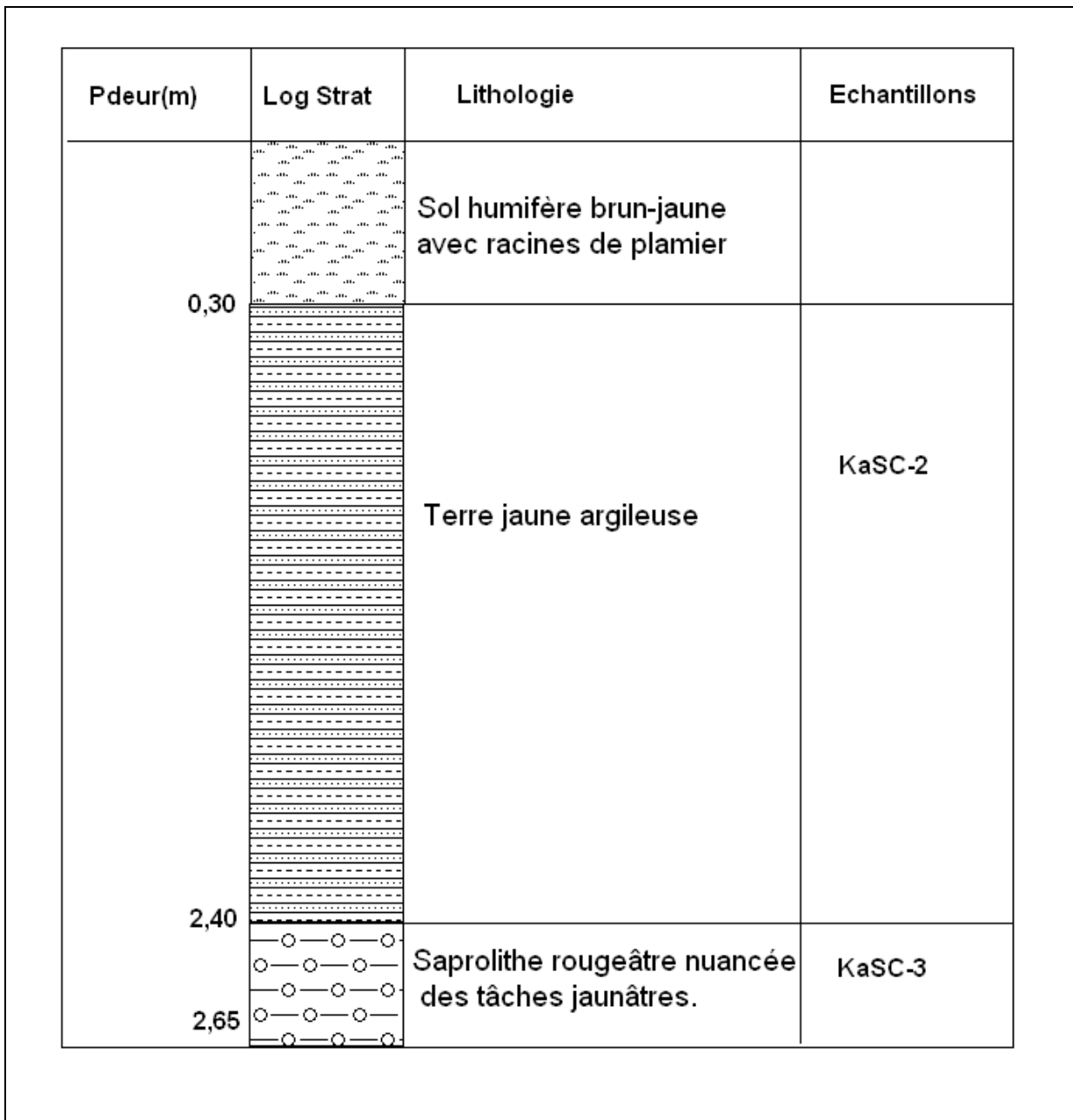


Fig. 45: Coupe du puits Salongo à Kasangulu

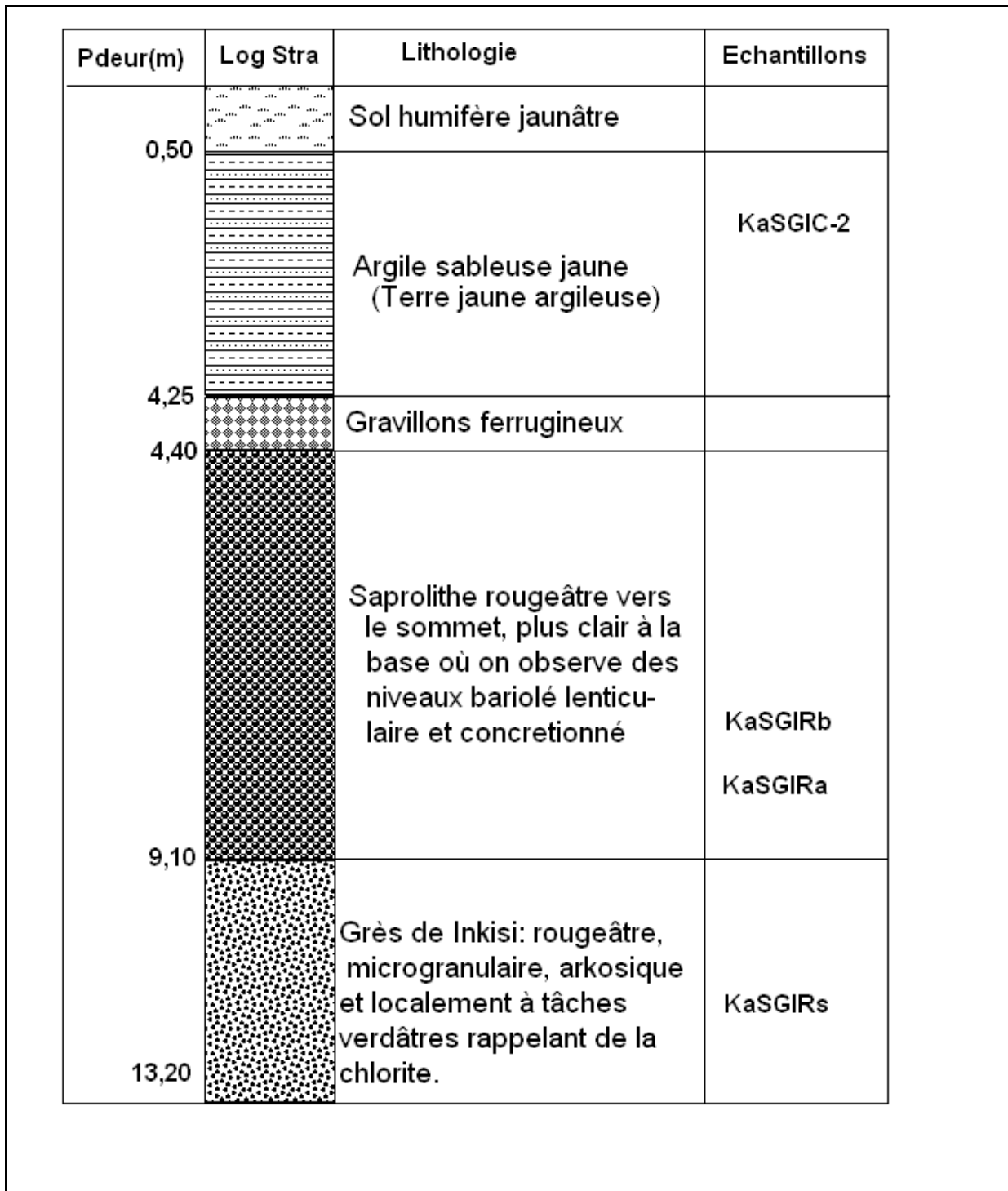


Fig. 46: Coupe de la carrière SGI à Kasangulu

III.3.4. Sites de Brikin et de Lutendele

III.3.4.1. Présentation et observations géo-environnementales

Créée depuis 1949, la société Brikin (Briqueterie de Kinshasa), aujourd'hui Congo-Briques, est la principale sinon l'unique unité de production industrielle des matériaux de construction de type briques et tuiles (planchers, blocs légers, cloisons, briques ordinaires, briques de façade et de pavements, tuyaux de drainage, claustras, ...) dans la ville province de Kinshasa. Elle est située à l'ouest de Kinshasa à moins de 2 Km du fleuve Congo à Kinsuka (Djelo-Binza) et couvrait une superficie totale d'environ six hectares.

Les matériaux argileux valorisés dans cette industrie provenaient essentiellement de Lutendele à plus ou moins 5 Km vers le sud. La terre ainsi extraite de sa concession, après broyage et laminage est entreposée pour une période de repos dans les silos. De là, le mélange de terre est transporté sur un ruban au groupe d'étirage où les filières donnent le profil désiré aux pièces et une coupeuse coupe le filon à la longueur voulue. Par un système d'ascenseurs, les pièces déposées sur les claies sont transportées à un des trois étages de l'usine ou par des chariots dans des séchoirs installés autour du bâtiment principal où le séchage naturel achèvera le premier stade de la fabrication. Après le séchage, les pièces sont enlevées et amenées dans un des vingt fours continus que comporte l'usine et lesquels utilisent le bois ou le charbon. Ces matériaux sont alors placés suivant une méthode propre à chaque sorte de pièces et, après un séchage complémentaire à l'air chaud, elles seront cuites à plus ou moins 900°C.

A ce jour, la société éprouve d'énormes difficultés liées (Fig.47):

- à la vétusté de l'outil de production, moins de 5 fours fonctionnent de manière relativement bien ;
- à la perte des concessions de matières premières de Lutendele lesquelles ont été récupérées par les propriétaires ;
- au lotissement illégal au sein des installations de production ;
- à la production trop limitée des briques à partir des matériaux jadis stockés dans les périmètres des installations ;
- à la crise de confiance de sa clientèle.



Fig. 47: Une vue désolante de l'usine de Brikina attestant sa vétusté

Cet état de délabrement très prononcé de Congo-Briques ne lui permet plus de satisfaire à la demande des populations environnantes.

Dans les environs du secteur de Lutendele à Kinsuka affleure la roche gréseuse de l'Inkisi qui est industriellement exploitée en carrières par les sociétés CARIGRES, SAFRICAS, Chinoise et Libanaise pour la production de concassés de différents calibres et des moellons devant servir comme matériaux de construction.

III.3.4.2. Description des points d'échantillonnage

Des échantillons ont été récoltés dans les anciennes carrières de l'Ex-Brikin. Des puits n'ont pas pu être forés mais des coupes rafraîchies ont permis d'échantillonner des sols sablo-argileux de couleur jaune tachetés de rouge (Fig.48).



Fig. 48: Echantillonnage dans les anciennes carrières de l'Ex-Brikin à Lutendele

III.4. Conclusions partielles

Six principaux sites d'exploitation des matériaux argileux des environs de Kinshasa ont été identifiés, cartographiés et ont fait l'objet d'un échantillonnage systématique et représentatif selon les différents lithofaciès rencontrés. Il s'agit de : Kingabwa, Kasangulu, Lemba Imbu, Ndjili Cecomaf, Lutendele et Brikin. Ces sites peuvent être regroupés en deux sous-ensembles selon la typologie du gisement dégagée des observations géologiques de terrain et de l'analyse de la bibliographie disponible :

- le gisement de type 1 (résiduel et d'origine sédimentaire) concerne les matériaux argileux issus des sites de Kasangulu, Lutendele et Brikin pour lesquels l'argile exploitée est localisée dans le manteau d'altération de la roche mère gréseuse sous-jacente. Ces matériaux argileux de couleur jaunâtre ou rougeâtre sont limoneux, sableux et latéritisés ;
- le gisement de type 2 (alluvionnaire) regroupe les sites de Kingabwa, Lemba Imbu et Ndjili Cecomaf qui produit de l'argile grasse, compacte, blanchâtre ou localement teintée de rouge et de jaune. Cette argile se trouve dans la plaine alluviale de la rivière Ndjili dans laquelle les couches argileuses sont interstratifiées avec des niveaux lenticulaires de sables, limons associés à l'ambre ou aux morceaux des bois fossilisés.

Si les argiles du gisement de type 1 sont exploitées en carrières par les petits entrepreneurs ou par l'industrie vétuste de Congo-briques pour la fabrication des briques, celles du second gisement le sont par les artisans. Ces argiles sont commercialisées localement (Boukin, cosmétique, pharmacie) et à l'étranger (Congo-Brazza, Angola et Gabon).

Des échanges avec les entrepreneurs couplés aux observations environnementales des sites d'exploitation, il se dégage les faits majeurs suivants :

- l'ouverture des puits d'exploitation dans les parcelles d'habitation, près des rivières, des routes dont la Nationale n°1 et du chemin de fer ;
- la non remise à l'état initial de ces puits après exploitation ;
- l'usage du bois pour cuire les briques et sécher les baguettes ;
- l'inexistence ni d'un cadre d'encadrement des exploitants artisanaux par le pouvoir public, ni d'un cadre de concertation pour l'exploitation et la gestion des ressources minérales argileuses non renouvelables qui intègrent les principes du développement durable.

Le site de Kingabwa dans la commune de Limete à Kinshasa et celui de Kasangulu à \pm 30 Km de Kinshasa ont été choisis comme sites pilotes pour la réalisation des travaux de caractérisations (en laboratoires) et de valorisations appropriées des matériaux naturels.

Par ailleurs, les observations géologiques et géo-environnementales faites sur terrain montrent clairement que certaines limites des Formations géologiques définies sur la carte géologique de Kinshasa (Feuille Léopoldville, S.5/15) ne correspondent pas avec la réalité. En effet, certains terrains du Néo-protérozoïque ont été assimilés au Cénozoïque ou au Mésozoïque dans cette carte éditée aux années soixante. Couplés aux images satellitaires de bonne résolution, des travaux de terrain plus importants (tels que des coupes géologiques ou des géotraverses) devront permettre de redéfinir et de retracer avec plus de précision les contours des formations géologiques de cette région.

La révision, dans le cadre du Projet de Géologie Urbaine et péri-urbaine, de la carte géologique de la province de Kinshasa est donc plus que nécessaire car cette dernière est un des outils indispensables pour une meilleure gestion environnementale et minière.

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET VALORISATION DES MATERIAUX NATURELS

IV.1. Introduction

Aujourd'hui, plus que tout autre matériel, le sol est à la base des constructions humaines. Les raisons de sa popularité, sa disponibilité, sa facilité à être extrait et à être travaillé (moulé), assure son utilisation en tant que matériau de construction pour le futur. La nature chimique, la forme physique, l'état de surface des différentes matières constitutives de ce matériau lui confèrent des propriétés particulières valorisables dans plusieurs secteurs industriels.

Les argiles sont des roches formées de minéraux particuliers, dits argileux, associés à des impuretés présentes en proportions variables, elles-mêmes composées d'éléments siliceux en partie prépondérante, d'oxydes et de sels métalliques divers, généralement trouvés à basse concentration mais pouvant influencer d'une manière très sensible sur leurs propriétés.

Il est donc indispensable pour appréhender un matériau argileux de le caractériser, c'est-à-dire d'en analyser les propriétés. De nombreuses techniques de caractérisation des matériaux existent et reposent essentiellement sur différents principes physicochimiques de base.

Pour une utilisation optimale des matériaux argileux des environs de Kinshasa dans la filière de la céramique et/ou dans d'autres domaines industriels, un ensemble cohérent de techniques de caractérisation adapté à ces matériaux ont été employées. Il s'agit de caractérisations :

- géotechniques (teneur en eau naturelle, teneur en matières organiques, équivalent de sable, granulométrie, limites d'Atterberg, pH, Proctor Normal Modifié) ;
- microscopiques ;
- chimiques (fluorescence X, spectroscopie d'absorption atomique) ;
- minéralogiques (diffraction des rayons X, spectroscopie infrarouge).

IV.2. Essais d'identification géotechniques

IV.2.1. Teneur en eau naturelle

IV.2.1.1. Principe

La détermination de la teneur en eau naturelle est basée sur la formule ci-après :

$$W (\%) = 100 (P_h - P_s) / P_s$$

Avec : P_h , le poids de l'échantillon de sol à l'état naturel ;

P_s , le poids de cet échantillon de sol après passage à l'étuve à 105°C pendant 24 heures. C'est le poids net sec qui est égale à la différence du poids total sec au poids de la tare utilisée ;

$P_h - P_s =$ Poids d'eau (COSTET J., SANGLERAT G., 1981 ; HOLTZ R.D., KOVCAS W.D., 1991).

IV.2.1.2. Résultats

Les mesures faites au cours de cet essai sont reprises dans le tableau n°24.

Tableau 24:Les teneurs en eau naturelle de matériaux naturels

Sites	Echantillons	Poids humide + Tare (g)	Poids sec + Tare (g)	Poids de la Tare (g)	Poids d'eau (g)	Poids net sec (g)	W (%)
Kingabwa	KiS ₅ 2A	103,1	76,51	13,72	26,59	62,79	42
	KiS ₅ 2B	81,33	56,98	13,96	24,35	43,02	56
	KiS ₅ C-3	70,94	46,61	13,67	24,33	32,94	74
	KiS ₅ C-4	123,43	99,83	14,00	23,60	85,83	28
	KiS ₄ C-2	82,69	63,95	14,27	18,74	49,68	38
	KiS ₄ C-3	114,45	96,79	14,12	17,66	82,67	21
	KiS ₃ C-2	72,02	57,28	13,67	14,74	43,61	34
KiS ₃ C-4	83,26	60,67	13,17	22,59	47,50	47	
Kasangulu	KaNiC-2	95,22	87,78	12,96	7,44	74,82	10
	KaNiC-3	91,30	78,43	13,96	12,87	64,47	20
	KaN ₁ C-2	88,00	77,34	13,97	10,66	63,37	17
	KaN ₁ C-3	90,85	78,40	14,18	12,45	64,22	19
	KaSSC-2	94,18	82,44	14,27	11,74	68,17	17
	KaSGIC-2	112,34	100,20	12,97	12,14	87,23	14

Les matériaux de Kingabwa présentent des teneurs en eau naturelle assez considérables qui varient entre 21 et 74% contre des teneurs inférieures à 21% pour ceux de Kasangulu.

Ces variations de teneurs en eau naturelle peuvent être liées à la quantité d'éléments fins ou argileux contenus dans les échantillons analysés.

IV.2.2. Teneur en matières organiques

IV.2.2.1. Principe

Dans le domaine de la céramique et plus particulièrement dans le secteur de la briqueterie, les substances organiques affectent beaucoup les processus de stabilisation et de cuisson et par là la qualité des produits finis (CERATEC, 1997 ; GUEERRAOUI F. et al., 2008).

La teneur en matières organiques (M.O) contenues dans le sol est égale au rapport de la différence entre le poids initial de l'échantillon **p** et le poids de l'échantillon après la réaction **P'** au poids initial d'essai **P** (100 grammes).

$$\mathbf{M.O\ (\%) = 100(p - P') / P}$$

Le poids **P'** est obtenu après les opérations suivantes :

- peser 100g d'échantillon et le mettre dans un bécher de 500ml ;
- ajouter 200cc d'eau distillée et 20cc d'eau oxygénée, 10 volumes ;
- laisser reposer le mélange pendant 2 heures ;
- sécher à l'étuve à 105°C ;
- peser le mélange.

IV.2.2.2. Résultats et discussions

Le tableau n°25 présente le pourcentage en matières organiques des échantillons de matériaux naturels récoltés dans les six sites de Kinshasa et environs.

Tableau 25: Les teneurs en matières organiques des matériaux naturels

Sites	Echantillons	Poids sec + Tare avant essai (p en grammes)	Poids sec + Tare après essai (P' en grammes)	M.O (%)
Kingabwa	KiS ₅ 2A	404,86	404,78	0,1
	KiS ₅ 2B	408,81	408,35	0,5
	KiS ₅ C-3	410,69	410,59	0,1
	KiS ₅ C-4	410,74	410,39	0,3
	KiS ₄ C-2	413,69	412,26	1,4
	KiS ₄ C-3	409,82	409,69	0,1
	KiS ₃ C-2	412,76	412,14	0,6
	KiS ₃ C-4	412,09	411,66	0,4
Kasangulu	KaNiC-2	408,61	408,09	0,5
	KaNiC-3	410,39	409,66	0,7
	KaN ₁ C-2	411,15	410,61	0,5
	KaN ₁ C-3	412,47	411,84	0,6
	KaSSC-2	411,46	410,94	0,5
	KaSGIC-2	410,86	410,35	0,5

Les échantillons analysés ont des teneurs en matières organiques inférieures à 2%. Ce sont donc des sols très pauvres en matières organiques et sont, géotechniquement qualifiés de sols inorganiques (CALLAUD M.J., 2004 ; GUERRAOU F. et al., 2008). Leur effet négatif dans les procédés de fabrication des briques (stabilisation ou cuisson) est, de ce fait, négligeable.

IV.2.3. Equivalent de sable

IV.2.3.1. But de l'essai

Réalisé sur la fraction des matériaux passant au tamis de 5mm, l'essai d'équivalent de sable rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments les plus fins contenus dans cette fraction, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les plus fins (argiles par exemple). Selon la valeur de l'Equivalent de Sable (ES) obtenu (Tabl. 26), le sol est ainsi qualifié (CALLAUD M.J., 2004).

Tableau 26: Qualification de sols sur base de l'Equivalent de Sable

Nature du sol	Equivalent de Sable (%)
Argile pure	0
Sol plastique	20
Sol non plastique	40
Sable pur et propre	100

IV.2.3.2. Principe

IV.2.3.2.1. Matériels et réactifs

Pour réaliser cet essai, l'appareillage simple utilisé et les réactifs sont composés essentiellement de :

- tamis de 5mm d'ouverture de maille ;
- cristallisoirs et godets d'échantillons;
- burettes graduées 500ml ;
- entonnoir à large ouverture ;
- agitateur ;
- une balance ;
- une latte de 500mm graduée en millimètre ;
- un chronomètre ;
- une étuve ;
- une solution concentrée préparée et contenant 111g de chlorure de calcium anhydre, 480g de glycérine, 13g de formaldéhyde et de l'eau distillée ;
- une solution lavante préparée en prélevant 125cm³ de la solution concentrée et en l'étendant à 5l avec de l'eau distillée.

IV.2.3.2.2. Mode opératoire et calcul

Quatre échantillons de matériaux naturels issus du site de Kasangulu ont été soumis à l'essai d'équivalent de sable selon le mode opératoire dont les principales étapes sont ainsi résumées :

- afin de favoriser la mise en place de la prise d'essai, la solution lavante a été siphonnée dans l'éprouvette cylindrique jusqu'au trait repère inférieur ; la prise d'essai humide correspondant à un poids sec de 200g de matériau est soigneusement versée, à l'aide de l'entonnoir, dans l'éprouvette cylindrique posée verticalement ;
- après avoir correctement mouillé l'échantillon et laissé reposer pendant dix minutes, l'éprouvette cylindrique bouchée à l'aide d'un bouchon de caoutchouc, est fixée sur la machine d'agitation pour y subir 90 cycles en 30 secondes ;
- la solution lavante est utilisée pour rincer et/ou laver le bouchon de caoutchouc, les parois de l'éprouvette et le sable pour faire remonter les éléments argileux tout en maintenant l'éprouvette en position verticale ;
- lorsque le niveau du liquide atteint le trait repère supérieur, on laisse reposer sur une table stable pendant 20 minutes au bout desquelles la hauteur h_1 du niveau supérieur du floculant est mesurée à l'aide d'une latte et h_2 à l'aide d'une sonde que l'on appuie sur le sédiment de sable au fond de l'éprouvette.

Pour les deux prises d'essais réalisés sur les échantillons de Kasangulu, l'équivalent de sable mesuré au piston à une température du local de 22°C est donné par la formule suivante :

$$ES = 100(h_2 / h_1)$$

IV.2.3.3. Résultats

Le tableau n°27 présente les résultats obtenus sur la mesure de l'équivalent de sable pour les deux prises d'essais des échantillons de Kasangulu.

Tableau 27: Résultats de l'équivalent de sable de matériaux naturels de Kasangulu

Echantillons	h ₁ (mm)		h ₂ (mm)		ES (%)		Observations
	Essai 1	Essai 2	Essai 1	Essai 2	Essai 1	Essai 2	
KaSGIRb	185	186	74	75	40	40	Sol non plastique
KaSGIC-2	300	295	32	30	11	10	Sol argileux
KaN ₁ C-2	323	320	43	45	13	14	Sol argileux
KaN ₁ C-3	278	280	37	36	13	13	Sol argileux

IV.2.4. Etude granulométrique

IV.2.4.1. Techniques d'analyse utilisées

Le champ adéquat d'application technologique de matériaux argileux est fortement fonction de la connaissance de leurs caractéristiques granulométriques.

Basées sur des principes variés : séparation mécanique ou par l'intermédiaire d'un fluide (gaz ou liquide), variation de résistance électrique, imagerie, diffraction ou absorption de rayonnements, les techniques d'analyse granulométrique (distribution de différents grains ou particules en fonction de leurs poids, taille, forme, ...) sont multiples. Les plus courantes sont (STEIN R., 1985 ; KENNETH P., SIMON J. BLOTT, 2004) :

- le tamisage ;
- la sédimentométrie ;
- la sédigraphie ;
- le compteur de coulter ;
- l'analyse par imagerie (microscopie) ;
- la diffraction laser.

Néanmoins, toutes ces techniques ne peuvent être appliquées et/ou appropriées à la même fraction granulométrique. Le choix de la méthode d'analyse, lié aux objectifs de l'étude envisagée, repose surtout sur la taille des particules mais

également sur les paramètres complémentaires tels que la morphologie (forme) et la répartition des particules.

De nombreux facteurs sont donc susceptibles d'influer sur les résultats obtenus par chacune de ces techniques et limitent ainsi leur utilisation vis-à-vis de certains matériaux.

Le tableau n°28 récapitule les différentes techniques granulométriques appliquées dans le cadre de ce travail. Les résultats obtenus sont comparés et discutés en vue de l'utilisabilité des matériaux argileux analysés dans le secteur de la céramique.

Tableau 28: Techniques d'analyse granulométrique utilisées

Fractions granulométriques	Techniques	Modèles	Additifs (Dispersants)	Laboratoires
2,38 mm-74 μ m	Tamissage	-	-	Géotechnologies (GEO ³ -ULg)
74 – 0,001 μ m	Sédimentométrie	-	HMPNa	Géotechnologies (GEO ³ -ULg)
< 74 μ m	Diffraction laser	Mie Fraunhofer	HMPNa	LMC (GeMMe-ULg)
Echantillon brut	Diffraction laser	Mie	PMMA (Dolapix)	LCIS (Chimie-ULg)
Echantillon brut	Analyse d'images	-	-	GeMMe-ULg

HMPNa : Hexamétaphosphate de sodium,
PMMA : Polymétacryllate d'ammonium.

Les différentes fractions granulométriques sont désignées selon la classification de l'Association Belge pour l'Etude, l'Essai et l'Emploi des Matériaux (A.B.E.M) présentée de la manière suivante:

- argiles : <0,002mm ;
- limons : 0,002 -0,060mm ;
- sables fins : 0,060 – 0,200mm ;
- sables grossiers : 0,200 – 2,00mm ;
- graviers : 2,00 – 20,00mm.

IV.2.4.2. Tamissage et sédimentométrie

IV.2.4.2.1. Matériels et produits

Lors de l'analyse granulométrique par tamissage et par sédimentométrie, les matériels ci-après ont été utilisés. Il s'agit de :

- séchoir à plus au moins 35°C ;
- étuve à 105°C ;

- tamis de mailles carrées (0,074mm, 0,149mm, 0,297mm, 0,590mm, 1,190mm, 2,38mm) de l'échelle ASTM ;
- agitateur mécanique de style Milk shake standardisé ;
- bain thermostatique calibré à 20°C ;
- thermomètre ;
- aréomètre ;
- chronomètre ;
- balance de précision ;
- pycnomètre ;
- burettes et vase de Berlin ;
- dessiccateur ;
- cloche à vide et broyeur à disque ;
- cristallisoirs.

La solution de 40g/l d'hexamétaphosphate de sodium a été préparée pour servir de défloculant secondaire.

IV.2.4.2.2. Mode opératoire

L'analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie a été réalisée selon le mode opératoire ci-dessous:

- sécher les échantillons au séchoir à $\pm 35^{\circ}\text{C}$;
- broyer manuellement les échantillons séchés en vue d'obtenir une poudre devant servir à l'analyse granulométrique ;
- tamiser à sec jusqu'à 2,38mm ;
- prélever un échantillon assez représentatif de plus ou moins 50gr pesé juste dans le cas d'un matériau fin (limon ou argile) ou de plus ou moins 100gr pesé juste pour des matériaux plus grossiers (sable par exemple) ;
- mettre l'échantillon dans un vase de Berlin, y ajouter 125ml de la solution d'hexamétaphosphate de sodium et laisser agir pendant 24 heures ;
- passer chaque échantillon à l'agitateur mécanique durant une minute ;
- transférer les échantillons dans des burettes graduées et compléter avec de l'eau déminéralisée jusqu'à la graduation d'un litre ;
- mettre les récipients en place dans un bain thermostatique jusqu'à atteindre la température de 20°C ;
- sortir les récipients (burettes) du bain et passer à l'agitation manuelle pendant une minute ;
- remettre les récipients au bain thermostatique, immerger lentement l'aréomètre, déclencher le chronomètre et commencer les mesures à 1', 2', 5', 15', 45', 2h, 5h et 24h ;
- après avoir terminé avec la lecture de toutes les mesures sur l'échelle correspondant à l'aréomètre utilisé dans le bain thermostatique, laver à l'eau

la solution sur un tamis de 74 μ m pour éliminer le passant à 74 μ m : on recueille alors les refus obtenus en vue de leur tamisage. Pour ce faire, ces refus sont séchés à l'air libre, pesés juste et passés aux tamis de 1,190mm, 0,590mm, 0,297mm, 0,149mm et 0,074mm. Les refus de chacun de ces tamis sont également pesés et cumulés.

La détermination du poids volumique réel (γ_s) des matériaux analysés s'est réalisée en utilisant des pycnomètres tarés comme suit (Tabl.29).

Tableau 29: Tarage des pycnomètres

Sites	N° Pycnomètre	Echantillons	Poids du pycnomètre rempli d'eau (g)
Kasangulu	S14	KaN ₁ C-2	226,664
	55	KaN ₁ C-3	227,212
	S13	KaSGIC-2	221,761
	57	KaSGIRb	219,376
Kingabwa	58	KiS ₅ 2A	219,611
	R6	KiS ₅ 2B	227,127
	B8	KiS ₃ C-4	224,830
	S18	KiS ₄ C-2	222,483

Les étapes suivies pour la détermination de poids volumiques sont :

- passer les échantillons au tamis de 2,38mm et les étuver à 105 \pm 5°C pendant 24h jusqu'à poids constant ;
- broyer les échantillons au broyeur à disque pour obtenir une poudre ;
- replacer les échantillons à l'étuve pour éliminer d'éventuelles bulles d'eau ;
- refroidir les échantillons au dessiccateur ;
- peser le pycnomètre rempli d'eau sans échantillon, soit m_1 ;
- peser le pycnomètre avec un peu d'eau en y incorporant une quantité donnée d'échantillon (sans bouchon), soit m_2 ;
- placer le pycnomètre sous la cloche à vide ;
- mettre le pycnomètre à niveau avec de l'eau ;
- placer le pycnomètre au bain thermostatique à 20°C ;
- essuyer le pycnomètre après avoir placé le bouchon percé puis peser, soit m_3 ;
- calculer γ_s des échantillons.

Quant à la détermination de la teneur en eau (W), des cristallisoirs utilisés ont été étalonnés de la manière suivante (Tabl.30).

Tableau 30: Etalonnage des cristallisoirs pour l'obtention de la teneur en eau

Sites	N° Cristallisoir	Echantillons	Masse du cristallisoir (g)
Kasangulu	71	KaN ₁ C-2	72,10
	23	KaN ₁ C-3	56,89
	60	KaSGIC-2	64,75
	64	KaSGIRb	66,72
Kingabwa	75	KiS ₅ 2A	66,68
	19	KiS ₅ 2B	67,61
	34	KiS ₃ C-4	68,05
	12	KiS ₄ C-2	62,06

Pour ce faire, les étapes suivantes ont été suivies pour déterminer la teneur en eau:

- placer les échantillons humides dans des cristallisoirs respectifs et les peser, m'_1 ;
- passer ces échantillons à l'étuve à $105^\circ \pm 5^\circ\text{C}$ pendant 24h ;
- peser les échantillons étuvés, soit m'_2 ;
- déduire le poids de l'eau et celui des particules solides en vue de calculer la teneur en eau (W).

IV.2.4.2.3. Calculs et encodage des données

(1) Poids volumique réel

Le poids volumique réel (γ_s) des matériaux analysés est obtenu en divisant le poids des particules solides (W_s) par le volume de ces mêmes particules (V_s) (CALLAUD M.J, 2004).

$\gamma_s = (W_s / V_s)$, avec $W_s = m_2 - m_1$ et $V_s = W_s - (m_3 - \text{tare du pycnomètre})$.

(2) Teneur en eau

Le rapport du poids de l'eau (W_w) sur le poids des particules solides (W_s) donne la teneur en eau des échantillons analysés (CALLAUD M.J, 2004).

$W(\%) = 100(W_w / W_s)$, avec $W_w = m'_1 - m'_2$ et $W_s = m'_2 - \text{poids du cristallisoir}$.

(3) Diamètre des particules

Liant la vitesse de chute d'une sphère dans un liquide par l'action de la gravité, la loi de STOCKES est utilisée en sédimentométrie pour notamment mesurer les viscosités des liquides et analyser les particules en suspension. Elle est particulièrement plus connue sous la forme :

$$u = g D^2 (\gamma_s - \gamma_w) / 18\eta$$

dans laquelle :

U : vitesse de chute de la particule en cm/s ;

D : diamètre de la particule en cm ;

γ_s : poids volumique de la particule en gr/cm³ ;

γ_w : poids volumique du liquide en gr/cm³ ;

g : accélération de la pesanteur en cm/s² ;

η : viscosité du liquide en poises.

Cette loi introduit donc une notion de « diamètre équivalent » pour les particules de sols. Ce diamètre qui se déduit de l'équation précédente, se présente comme suit :

$$D^2_{(mm)} = (30 \cdot \eta \cdot Hr) / g(\gamma_s - \gamma_w)$$

t : temps en minutes ;

Hr : profondeur du centre de Poussée G en cm.

(4) Pourcentage d'éléments inférieurs à D

A l'instant t, à la profondeur Hr à laquelle est faite la mesure de densité, il n'y a plus de particules de diamètre supérieur à D car leur sédimentation est plus rapide. D'autre part, au même instant t, la concentration de la suspension en particules de diamètres inférieurs ou égaux à D à la profondeur Hr est la même qu'à l'instant initial.

Le pourcentage des particules de diamètres inférieurs à D se calcule par la formule suivante:

$$(<D) = \frac{\gamma_s \cdot R_1}{(\gamma_s - \gamma_w) P_s} [1 - (>2,38)] \quad R_1 = C_3 \cdot L + C_4$$

C₃ : facteur de transformation à partir de 1/1000 ;

C₄ : lecture dans le liquide seul (eau) ;

L : lecture en échelle 1/1000 au-delà de 1.

L'équation R₁ a été établie expérimentalement au laboratoire en vue de déterminer la « correction composée » à apporter aux lectures pour tenir compte :

- des variations de température en cours d'essai (correction Ct) ;
- du ménisque (correction Cm) ;
- du défloculant (correction Cd).

Pour ce faire, l'aréomètre BII (386128) utilisé est ainsi étalonné à 20°C (Tabl.31).

Tableau 31: Caractéristiques de l'aréomètre BII

Aréomètre	Facteurs				
	C ₁	C ₂ ¹	C ₂ ²	C ₃	C ₄
BII (386128)	-0,180	18,94	17,82	0,627	-4,14

(5) Encodage des données

A la fin des essais et des calculs (γ_s , W_s), on passe à l'encodage de données ci-après dans le programme « LEVIG. EXE » en vue d'obtenir les courbes et les caractéristiques granulométriques des échantillons analysés :

- numéro de l'aréomètre ;
- lectures brutes de l'aréomètre (en 1/1000 ou g/l) ;
- poids volumiques et les poids secs ;
- poids total de l'échantillon ;
- refus cumulés sur les tamis de 2,38 à 76,2mm ;
- refus cumulés sur les tamis de 0,074 à 1,19mm ;
- température.

IV.2.4.2.4. Résultats et commentaires

Les valeurs de poids volumiques réels et les teneurs en eau des matériaux argileux de Kingabwa et de Kasangulu sont respectivement présentées dans les tableaux n°32 et 33.

Tableau 32: Poids volumique réel des échantillons analysés

Echantillons	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	Tare (g)	γ_s (g/cm ³)
KaN ₁ C-2	129,268	113,187	236,716	226,664	2,67
KaN ₁ C-3	143,056	126,543	237,564	227,212	2,68
KaSGIC-2	124,944	106,529	233,213	221,761	2,64
KaSGIRb	145,750	122,623	233,803	219,376	2,66
KiS ₅ 2A	134,352	123,716	226,148	219,611	2,65
KiS ₅ 2B	131,564	120,947	233,685	227,127	2,65
KiS ₃ C-4	128,908	122,037	229,047	224,830	2,64
KiS ₄ C-2	119,293	108,790	228,946	222,483	2,64

Tableau 33: Teneur en eau et poids secs des échantillons analysés

Echantillons	m ₁ (g)	m ₂ (g)	Tare (g)	W (%)	Ww (g)	P _s (g)
KaN ₁ C-2	161,2	160,14	72,10	1,2	57,1	56,4
KaN ₁ C-3	132,8	132,0	56,89	1,1	49,9	49,4
KaSGIC-2	172,1	171,47	64,75	0,6	83,7	83,2
KaSGIRb	146,6	145,46	66,72	1,4	71,7	70,7
KiS ₅ 2A	137,8	136,21	66,68	2,3	50,1	49
KiS ₅ 2B	155,5	153,64	67,61	2,2	50,5	49,4
KiS ₃ C-4	146,3	144,60	68,05	2,2	52,1	51
KiS ₄ C-2	142,7	141,11	62,06	2	56,7	55,6

De la lecture de données contenues dans ces tableaux il se dégage que les matériaux de Kingabwa ont des teneurs en eau variant entre 2 et 2,3% alors que ceux de Kasangulu montrent de valeurs plus faibles qui sont comprises entre 0,6 et 1,4%. Leurs poids volumiques respectifs varient entre 2,64 à 2,68 et de 2,63 à 2,65. Le caractère plus fin ou plus argileux des matériaux de Kingabwa par rapport à ceux de Kasangulu est ainsi mis en évidence.

Les lectures des mesures (en 1/1000 ou g/l) faites sur l'échelle d'aréomètre dans le bain thermostatique à 20°C sont présentées dans les tableaux n°34 et 35.

Tableau 34: Mesures de l'aréomètre sur matériaux de Kasangulu

Temps	Echantillons			
	KaN ₁ C-3	KaSGIRb	KaSGIC-2	KaN ₁ C-2
1 minute	32	23	29,5	39,5
2 minutes	31	20,8	28,4	38,2
5 minutes	29,5	19	28	37,8
15 minutes	26,5	17	27,5	36,2
45 minutes	24	15	26,5	35
2 heures	22,8	13,2	26,2	33,8
5 heures	19,5	10	25	32,8
24 heures	14,2	9,5	24,2	30

Tableau 35: Mesures de l'aréomètre sur matériaux de Kingabwa

Temps	Echantillons			
	KiS ₃ C-4	KiS ₄ C-2	KiS ₅ 2A	KiS ₅ 2B
1 minute	55	59	52	56,2
2 minutes	54,8	58,5	51,2	56
5 minutes	54,2	57,2	50,2	55,2
15 minutes	53,8	56,8	47	55
45 minutes	51	54,2	45,2	52,8
2 heures	49	51,8	40,8	49,8
5 heures	46,5	47,2	38,5	46,8
24 heures	40,2	40	33,2	40

Les grandes valeurs des mesures d'aréomètre des échantillons de Kingabwa par rapport à ceux de Kasangulu soulignent bien la relation inversement proportionnelle qui existe entre la vitesse de sédimentation et la taille des particules des matériaux étudiés.

Alors que les matériaux de Kingabwa, plus argileux, sédimentent plus lentement, ceux de Kasangulu, plus sableux, le font plus rapidement avant la stabilisation respective après 24h entre 10 – 30 et autour de 40.

Les pourcentages de passants (Pc) et de refus (Rc) cumulés obtenus par tamisage des matériaux argileux de Kasangulu et de Kingabwa sont consignés dans les tableaux n°36 et 37.

Tableau 36: Les passants et refus cumulés des matériaux argileux de Kasangulu

Tamis (mm)	Echantillons							
	KaN ₁ C-3		KaSGIRb		KaSGIC-2		KaN ₁ C-2	
	Pc (%)	Rc (%)	Pc (%)	Rc (%)	Pc (%)	Rc (%)	Pc (%)	Rc (%)
76,2	100	0	100	0	100	0	100	0
38,1	100	0	100	0	100	0	100	0
19,05	100	0	100	0	100	0	100	0
9,52	100	0	100	0	100	0	100	0
4,76	100	0	100	0	100	0	100	0
2,38	100	0	100	0	100	0	100	0
1,19	100	0	99,9	0,0	100	0	99,9	0,1
0,59	100	0	99,8	0,1	99,3	0,5	99,7	0,2
0,297	92,4	3,7	81,7	12,9	89,2	9	93,6	3,6
0,149	66,6	16,5	43,4	40,0	56,1	36,5	72,7	15,4
0,074	57,2	21,1	28,2	50,8	34	55	61,2	21,9

Tableau 37: Les passants et refus cumulés des matériaux argileux de Kingabwa

Tamis (mm)	Echantillons							
	KiS ₃ C-4		KiS ₄ C-2		KiS ₅ 2A		KiS ₅ 2B	
	Pc (%)	Rc (%)	Pc (%)	Rc (%)	Pc (%)	Rc (%)	Pc (%)	Rc (%)
76,2	100	0	100	0	100	0	100	0
38,1	100	0	100	0	100	0	100	0
19,05	100	0	100	0	100	0	100	0
9,52	100	0	100	0	100	0	100	0
4,76	100	0	100	0	100	0	100	0
2,38	100	0	100	0	100	0	100	0
1,19	100	0	100	0	100	0	99,9	0
0,59	99,8	0,1	99,9	0,0	99,9	0	99,8	0,1
0,297	99	0,5	99,9	0,1	99,9	0,1	99,7	0,1
0,149	97,4	1,3	99,2	0,4	99,5	0,3	99,6	0,2
0,074	95,8	2,1	96,4	2,0	97,3	1,3	99,3	0,3

L'examen de ces deux tableaux ci-haut permet de montrer que :

1°) les matériaux de Kasangulu :

- sont uniquement composés des particules de taille inférieure à 2,38mm ;
- ont des passants au tamis de 74µm plus importants pour l'échantillon KaN₁C-2 (61%) ;
- sont constitués de plus de la moitié des particules de taille supérieure à 74µm pour ce qui est des échantillons KaSGIRb et KaSGIC-2 ;

2°) les échantillons de Kingabwa ont donné des refus cumulés au tamis de 74µm trop faibles, inférieurs à 2,5%, ce qui dénote le caractère plus fin de ces matériaux par rapport à ceux de Kasangulu.

Les résultats d'analyse sédimentométrique de ces deux sites pilotes, Kasangulu et Kingabwa, sont respectivement repris dans les tableaux n°38 et 39.

Tableau 38: Résultats de la sédimentométrie des échantillons de Kasangulu

Echantillons	Taille des particules (μm)	Pourcentage des particules (%)
KaN ₁ C-3	50	52
	36	50
	22	47
	13	40
	7	35
	5	33
	3	26
	1	15
KaSGIRb	54	23
	38	20
	23	18
	14	15
	8	12
	5	9
	3	5
	1	4
KaSGIC-2	52	28
	37	26
	22	26
	13	25
	7	24
	4	24
	3	22
	1	21
KaN ₁ C-2	48	59
	34	56
	21	56
	12	53
	7	51
	4	48
	3	47
	1	42

Tableau 39: Résultats de la sédimentométrie des échantillons de Kingabwa

Echantillons	Taille des particules (μm)	Pourcentage des particules (%)
KiS ₃ C-4	42	96
	30	96
	18	95
	10	94
	6	88
	4	84
	2	79
KiS ₄ C-2	1	67
	40	96
	29	95
	17	92
	10	91
	5	87
	3	83
KiS ₅ 2A	2	74
	1	61
	43	94
	31	92
	18	90
	10	83
	6	80
KiS ₅ 2B	4	70
	2	66
	1	55
	41	101
	29	101
	17	100
	10	99
KiS ₅ 2B	6	95
	4	89
	2	82
	1	68

D'après ces résultats, les matériaux de Kingabwa sont caractérisés par l'absence de la fraction supérieure à 50 μm . Sauf pour KiS₅2A, ces matériaux sont constitués des particules de taille de 1 μm à au moins 60%. Les particules de 10 μm sont présentes à plus de 90% à l'exception de l'échantillon KiS₅2A dans lequel elles forment 84%. L'échantillon KiS₅2B est le plus argileux de cette série.

La fraction granulométrique d'au moins 50 μm est bien présente dans certains échantillons des matériaux de Kasangulu : KaN₁C-3 (52%), KaSGIRb (23%) et KaSGIC-2 (28%).

Les courbes granulométriques totales (tamisage et sédimentométrie) des échantillons étudiés sont présentées graphiquement sur les figures n°49 et 50.

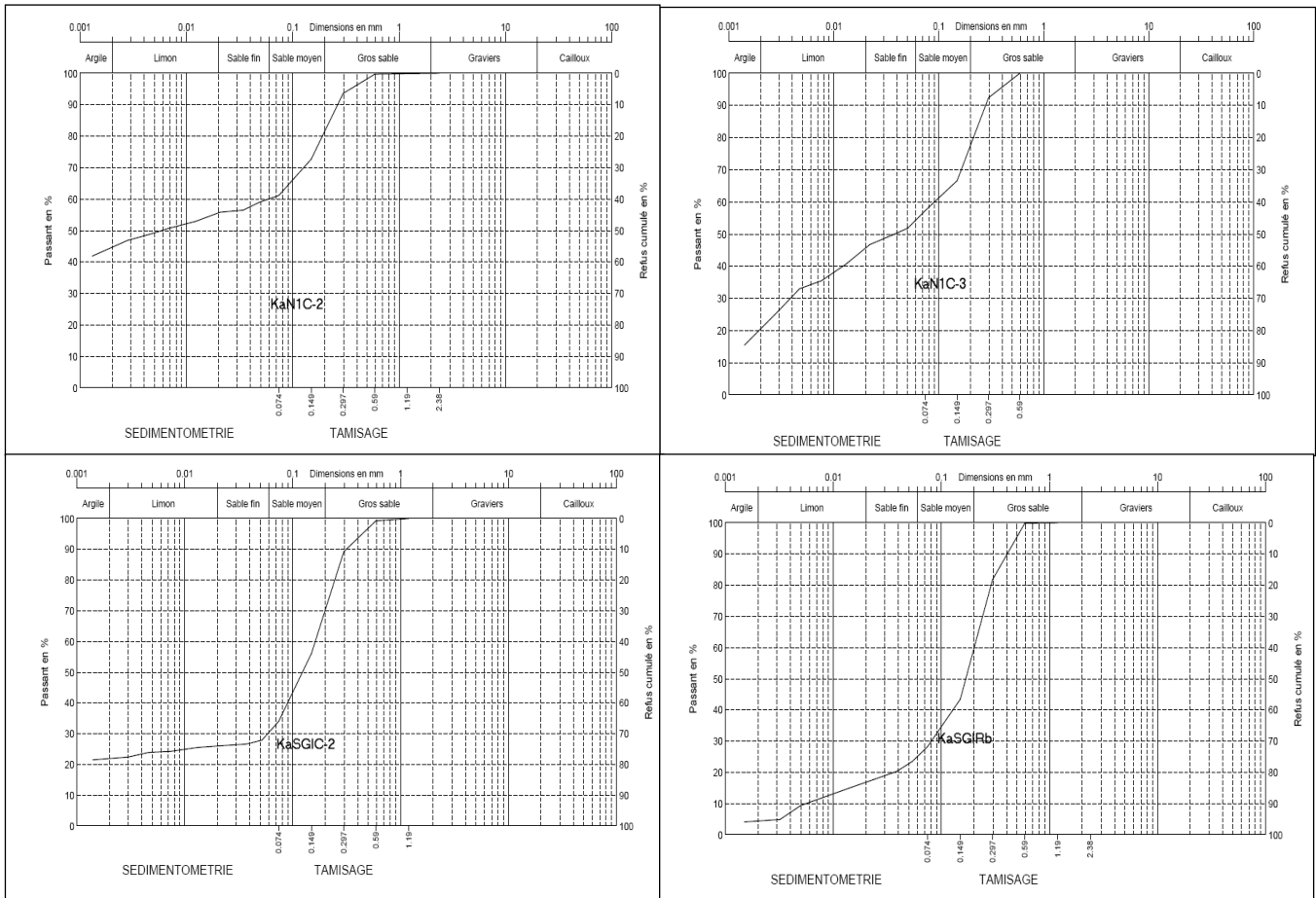


Fig. 49: Courbes granulométriques classiques des matériaux naturels de Kasangulu

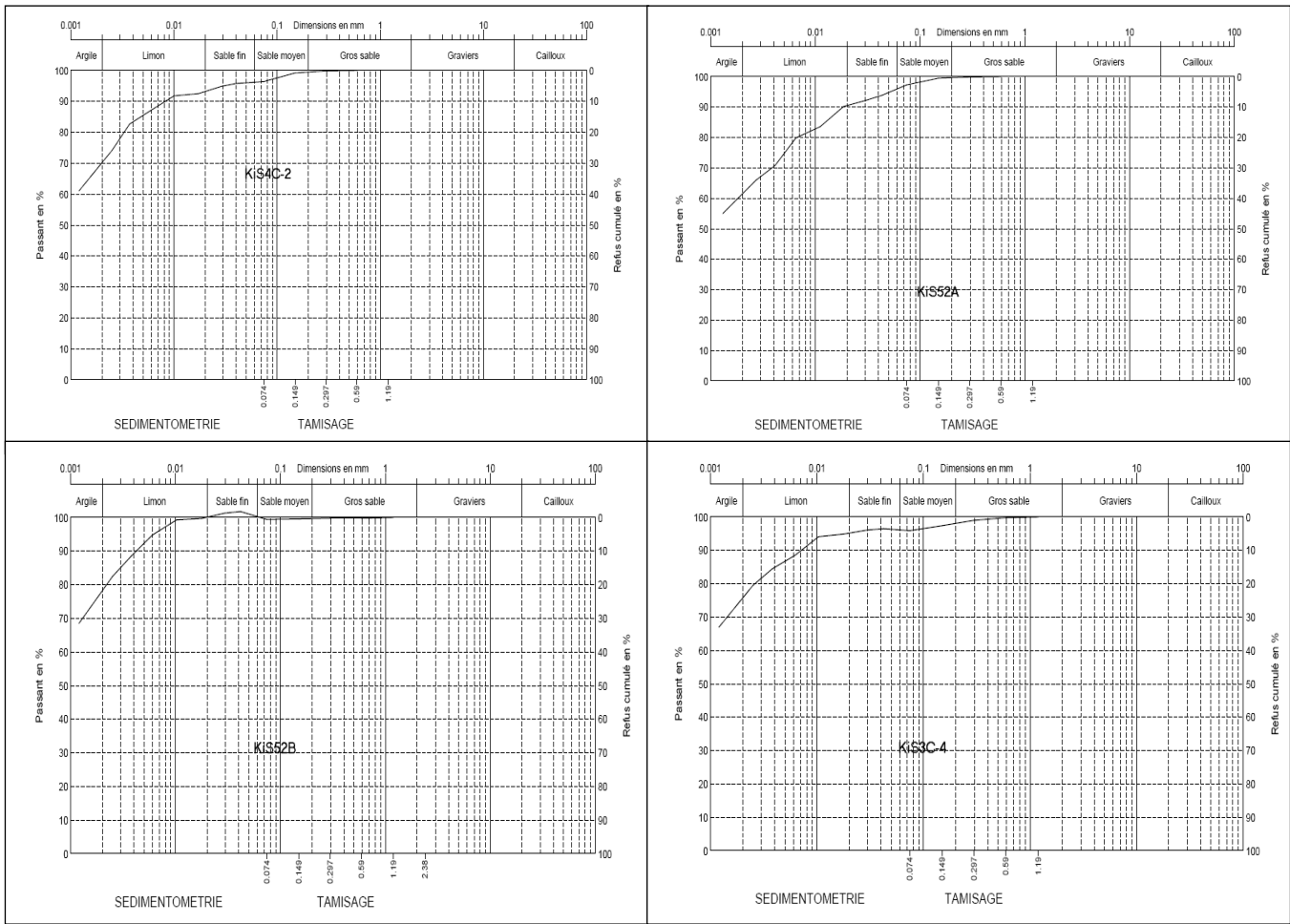


Fig. 50: Courbes granulométriques classiques des matériaux naturels de Kingabwa

Le tableau n°40 résume les principaux paramètres granulométriques de ces échantillons.

Le coefficient de HAZEN ($C_u = D_{60}/D_{10}$) et celui de courbure ($C_c = (D_{30})^2/D_{10} \cdot D_{60}$) calculés pour l'échantillon KaSGIRb ont donné des valeurs respectivement supérieures à 2 et à 3. Elles soulignent donc le caractère de la granulométrie non uniforme, plus étalée ou d'un matériau mal gradué (CALLAUD M.J, 2004).

Tableau 40: Quelques paramètres granulométriques des matériaux étudiés

Sites	Echantillons	<2 μ m (%)	P _{74μm} (%)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u	C _c
Kingabwa	KiS ₃ C-4	76	96	-	-	-	-	-
	KiS ₄ C-2	70	96	-	-	-	-	-
	KiS ₅ 2A	61	97	-	-	-	-	-
	KiS ₅ 2B	78	99	-	-	-	-	-
Kasangulu	KaN ₁ C-3	21	57	-	0,01	0,1	-	-
	KaSGIRb	4	28	0,01	0,08	0,2	3,6	5,7
	KaSGIC-2	22	34	-	0,06	0,01	-	-
	KaN ₁ C-2	45	61	-	-	0,06	-	-

IV.2.4.3. Granulométrie par diffraction laser

IV.2.4.3.1. Principe

Le principe de l'analyse granulométrique par diffraction laser est basé sur les théories de diffraction de Fraunhofer et de Mie (Fig.51) ainsi que sur la théorie de la sphère équivalente qui stipulent que l'angle de diffraction du rayon laser émis par une source de lumière intense et cohérente est inversement proportionnel à la taille de la particule (DE BOER G.B.J. et al., 1987 ; DUVAL O. et al., 2001 ; RAWLE A., 2001).

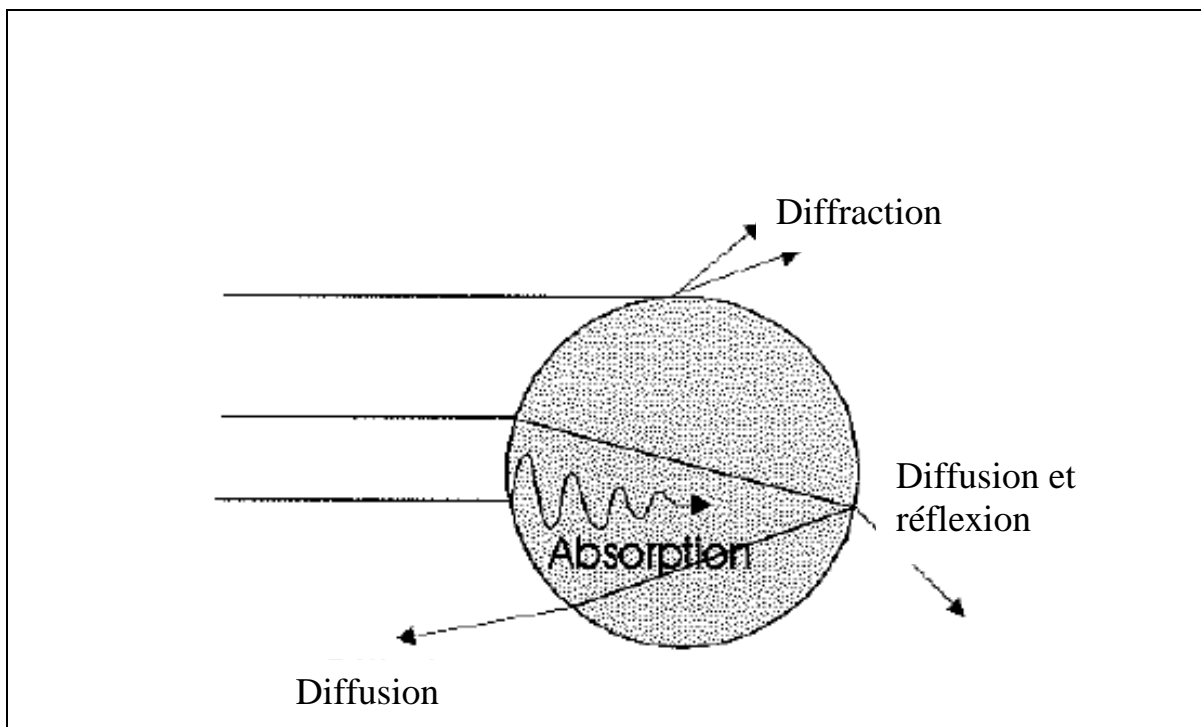


Fig. 51: Phénomènes physiques impliqués dans la théorie de Mie

IV.2.4.3.1.1. Modèle de Fraunhofer

La théorie de Fraunhofer indique que lorsqu'une particule est éclairée par un faisceau de lumière cohérente et monochromatique, il apparaît un motif de diffraction sous forme de franges concentriques alternativement claires et sombres (FERREOL V., 2002). Ainsi donc lorsque la dimension de la particule est grande devant la longueur d'onde incidente, ou lorsque le matériau est très absorbant, l'effet de bord des particules contribue pour une part prépondérante à l'intensité totale diffusée.

L'interférence provient alors principalement du contour de la particule, c'est-à-dire de la diffraction créée par la courbure de la lumière à l'interface. Dans ce cas, le modèle mathématique utilisé pour le calcul de la courbe granulométrique est la théorie de Fraunhofer qui présente l'avantage de s'affranchir totalement des propriétés optiques de l'échantillon et du milieu porteur.

IV.2.4.3.1.2. Modèle de Mie

En revanche, lorsque la dimension de la particule avoisine la longueur d'onde incidente, la théorie de Fraunhofer n'est plus adaptée à la description de la diffusion car les phénomènes de réflexion et de réfraction interviennent pour une part non négligeable dans l'intensité diffusée. C'est alors la théorie de Mie qui s'applique, laquelle prend en compte les indices de réfraction de l'échantillon et du milieu porteur. Ceci signifie que le faisceau laser traversant la cellule d'analyse va se propager sans déflexion jusqu'à ce qu'il rencontre une particule dont l'indice de réfraction est différent de l'indice de la phase continue. Ce changement d'indice va créer une réfraction du faisceau laser. La partie réfractée de la lumière pénétrant dans la particule va ressortir en étant toujours soumise aux phénomènes de réflexion et réfraction dus à la différence des milieux. En ayant subi plusieurs variations de son axe de propagation, le rayon va finalement arriver sur le détecteur.

Le granulomètre Malvern Mastersizer 2000 utilise cette théorie pour l'ensemble du spectre granulométrique bien que celle-ci se réduise à la théorie de Fraunhofer lorsque les particules sont de taille plus importante.

IV.2.4.3.1.3. Théorie de la sphère équivalente

Cette théorie est basée sur l'impossibilité de déterminer un grain grâce à une seule valeur de taille. Dans le cas d'un parallélépipède rectangle, par exemple, trois mesures sont nécessaires pour caractériser la taille de l'objet. Seule une sphère

parfaite est caractérisable par une seule valeur de taille qui est son diamètre. Le but de la théorie de la sphère équivalente est de décrire par une seule valeur la taille d'un objet en trois dimensions.

D'autres valeurs uniques caractéristiques d'une particule sont mesurables : sa masse par exemple. S'il était possible de déterminer la masse de chaque particule, le rayon d'une sphère de masse équivalente pourrait être calculé par la formule suivante :

$$m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho$$

m étant la masse de la particule, r le rayon de la sphère, ρ la masse volumique de la particule. Le diamètre $2r$ de la sphère du même poids que la particule est donc calculable. C'est la théorie de la sphère équivalente. Une propriété de la particule est donc mesurée et rapportée à une sphère de diamètre calculable, donnant un nombre unique pour caractériser la taille de la particule.

La taille d'une particule sera donc toujours rapportée, au granulomètre laser, à la taille de la sphère de volume équivalent à cette particule. Par exemple, le diamètre de la sphère équivalente à un cylindre de $20\mu\text{m}$ de diamètre et $100\mu\text{m}$ de longueur est de $39,1\mu\text{m}$. Un autre cas est la mesure d'une particule aplatie (cas des particules argileuses). Une particule de $20\mu\text{m}$ de diamètre et de $2\mu\text{m}$ d'épaisseur donnera un diamètre de la sphère équivalente d'environ $5\mu\text{m}$. Par tamisage, ces deux particules auraient donné la même valeur granulométrique. Grâce à la diffraction laser, ces particules apparaîtront différentes.

IV.2.4.3.2. Protocole expérimental

L'analyse granulométrique est faite par un granulomètre laser Malvern Mastersizer 2000 couplé à une unité de dispersion par voie humide HydroS (Fig.52). Avec des détecteurs placés du côté opposé de la source, ce granulomètre est muni de deux sources lasers différentes utilisées en routine : une lumière bleue et une lumière rouge. Les étapes suivantes, au Laboratoire de Chimie Inorganique Structurale (LCIS), ont été exécutées pour analyser les matériaux naturels:

- broyer les échantillons manuellement ;
- prélever 1g d'échantillon pesé;
- ajouter 10% de polymétacryllate d'ammonium (Dolapix CE 64) ;
- passer la solution (1g d'échantillon+10% Dolapix+25ml d'eau) dans un bain à ultrasons pendant quelques minutes en vue d'éliminer d'éventuels agglomérats ;
- après nettoyage et rinçage de la cuve granulométrique, remplir celle-ci par 100ml d'eau désionisée ;

- faire tourner l'agitateur à 2000 rpm et appliquer 20% d'ultrasons (puissance maximale de 50w) en vue d'un dégazage éventuel de l'eau ;
- mesurer le bruit de fond ;
- ajouter la solution contenant l'échantillon en gardant l'agitateur à 2000 rpm et les ultrasons à 20%. La quantité d'échantillon doit être ajustée afin d'obtenir un taux d'obscuration du rayon laser situé entre 10 et 20% ;
- lorsque le taux d'obscuration du rayon laser est stable (c'est-à-dire que l'échantillon est entièrement délité), mesurer l'intensité reçue par chacun des 52 détecteurs. Le temps de mesure est de dix secondes pour chacun de deux rayons lasers (bleu et rouge) avec une prise de 1000 mesures par seconde réalisées grâce au logiciel Mastersizer 2000 V. 5.0 connecté au granulomètre ;
- vider et nettoyer la cuve.

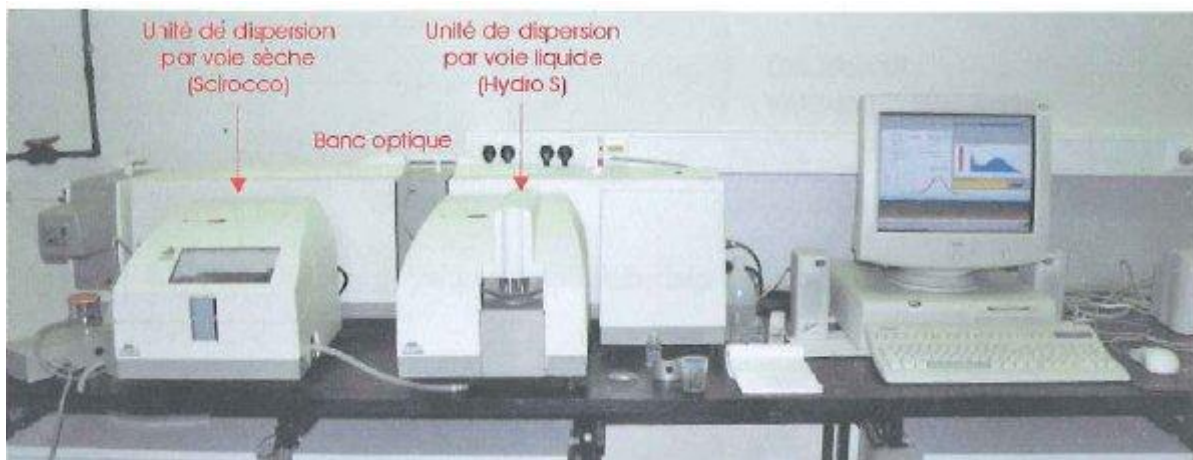


Fig. 52: Granulomètre laser Malvern Mastersizer 2000

La distribution granulométrique est déduite de l'interaction entre un ensemble de particules et le faisceau laser incident par l'analyse de la tâche de diffraction du faisceau. Les échantillons à analyser sont disposés dans une cuve contenant un solvant puis le fluide chargé en particules va circuler dans l'appareil et passer devant le faisceau laser. Les particules, assimilées à des sphères, vont alors modifier le parcours de la lumière : les grosses particules engendreront des rayons diffractés de faible incidence, tandis que les plus petites engendreront des rayons diffractés de forte incidence.

Tous les rayons diffractés ayant la même incidence seront ensuite concentrés en un même point, sur le même détecteur, par l'intermédiaire de lentilles de Fourier.

Dépourvue du bruit de fond, l'intensité reçue par chacun des détecteurs est automatiquement convertie en proportion granulométrique. Les mesures obtenues donnent des résultats sous forme de courbes de fréquences exprimées en pourcentage volumique en fonction de la taille des particules. Les données nécessaires sont aussi exportées au format Excel pour y subir des traitements adéquats. Les indices de réfraction ont été choisis à 1,544 pour les échantillons

(indice du quartz) et à 1,33 pour l'eau utilisée comme dispersant de base. Le taux d'absorption par les particules est automatiquement réglé à 0% selon le modèle Mie.

Les échantillons analysés au granulomètre laser Malvern Mastersizer 2000 au laboratoire des Matériaux de Construction (LMC-GeMMe) sont des quantités prélevées des passants au tamis de 74 μ m obtenus lors de la granulométrie classique. Ces échantillons ont été mélangés à la solution d'hexamétaphosphate de sodium (40gr/l) et passés aux ultrasons de 15h00 à 9h00 en vue de mieux disperser les particules et séparer des éventuels agglomérats. Ils sont ensuite analysés au granulomètre laser par les deux théories, Fraunhofer et Mie. Par règle de trois, les pourcentages de particules argileuses (fraction inférieure à 2 μ m) obtenus sont ramenés à l'ensemble de l'échantillon en tenant compte des passants cumulés au tamis de 74 μ m.

IV.2.4.3.3. Résultats de l'analyse par granulométrie laser

En modèle de Mie et en utilisant Dolapix comme dispersant secondaire, les pourcentages volumiques des fractions granulométriques des échantillons de deux sites d'étude sont présentés dans les tableaux n°41 et 42 et sur les figures n°53 et 54.

Tableau 41: Fractions granulométriques des matériaux naturels de Kasangulu

Echantillons	Argiles (%)	Limons (%)	Sables fins (%)	Sables grossiers (%)
KaN ₁ C-2	32	28	16	24
KaN ₁ C-3	4	53	14	28
KaSGIC-2	22	11	32	35
KaSGIRb	2	42	31	24

Tableau 42: Fractions granulométriques des matériaux naturels de Kingabwa

Echantillons	Argiles (%)	Limons (%)	Sables (%)	d ≤ 10 μ m (%)	d > 50 μ m (%)
KiS ₃ C-4	50	49	1	92	1
KiS ₄ C-2	40	53	6	80	7
KiS ₅ 2A	42	54	4	76	5
KiS ₅ 2B	59	41	0	97	0

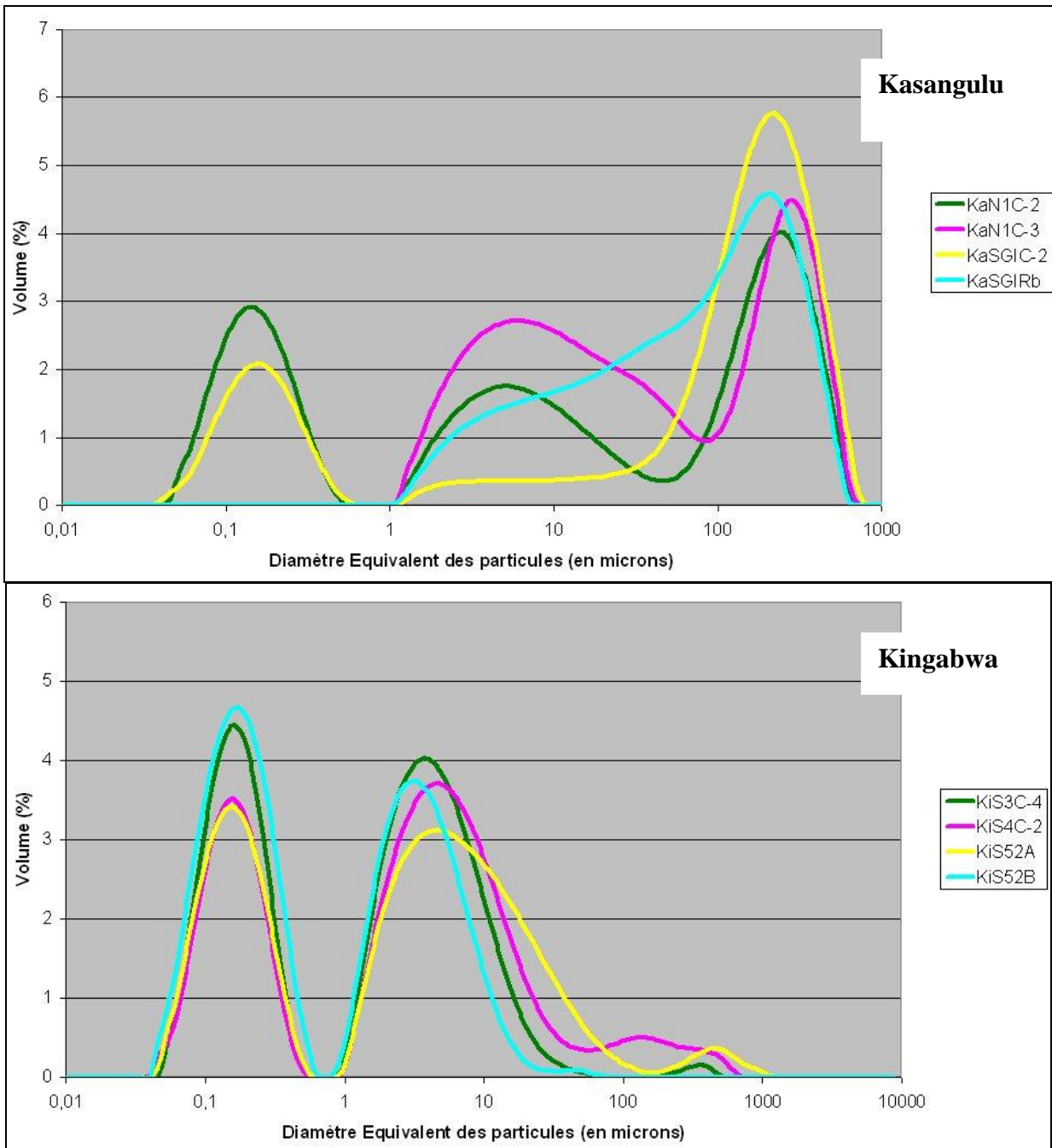


Fig. 53: Courbes granulométriques non cumulatives (Dolapix ; Modèle de Mie)

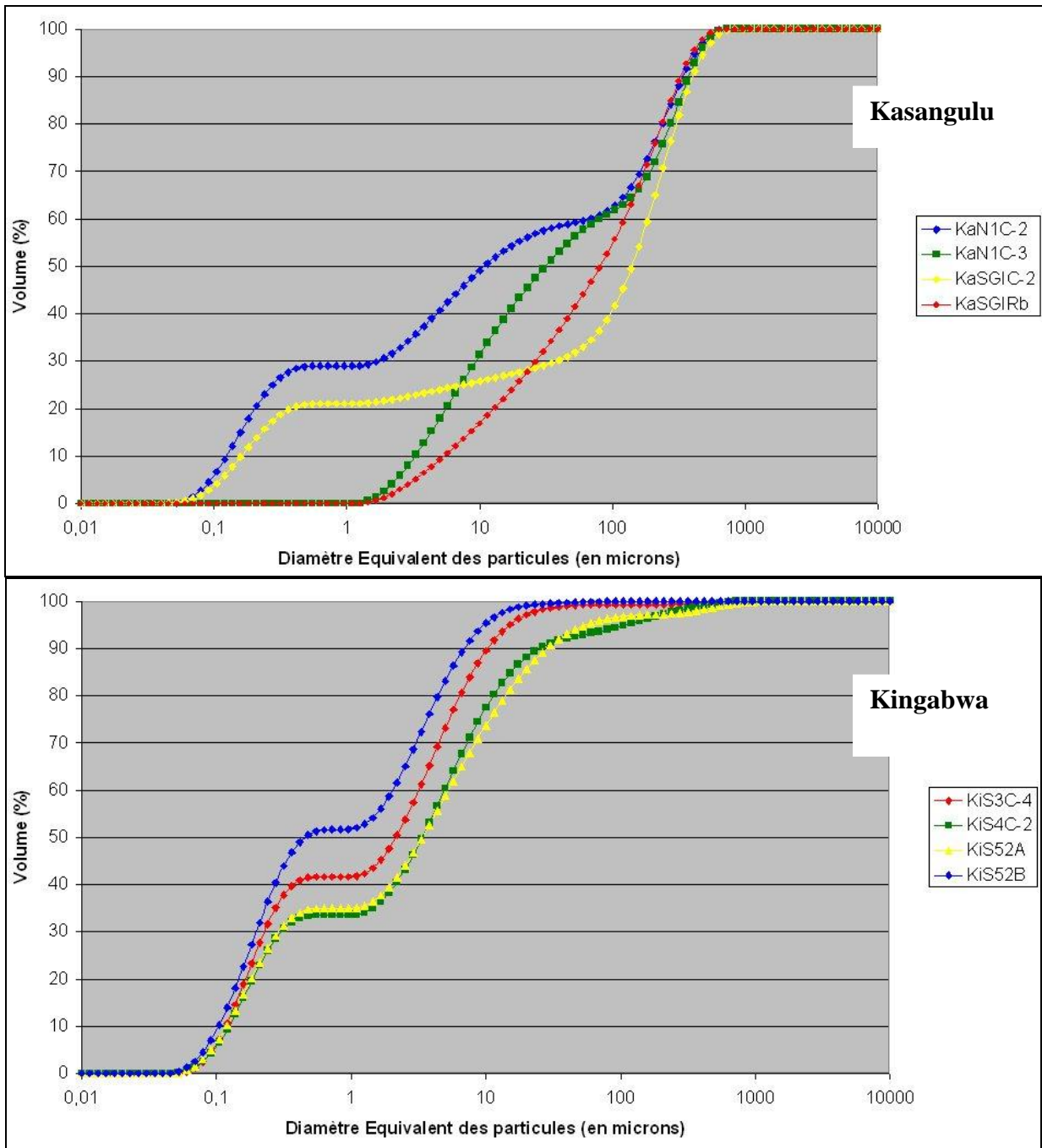


Fig. 54: Courbes granulométriques cumulatives (Dolapix ; Modèle de Mie)

Les matériaux de Kasangulu sont caractérisés par :

- la composition, en proportions variables, de quatre fractions granulométriques présentes dans chaque échantillon : argiles, limons, sables fins et sables grossiers ;
- la distribution globalement bimodale plus marquée pour les échantillons KaN_1C-2 et $KaSGIC-2$ pour lesquels les pourcentages volumiques respectifs en limons de 28% et 11% sont plus faibles par rapport aux autres échantillons ;
- une couche KaN_1C-3 fortement limoneuse (53%) et très faiblement argileuse (4%).

Quant aux matériaux de Kingabwa, les faits suivants méritent d'être soulignés :

- les fractions granulométriques argileuses et limoneuses sont présentes à plus au moins 95% dans chacun des échantillons ; celle sableuse ne représente qu'une proportion volumétrique mineure très négligeable ce qui justifie à juste titre la distribution bimodale des courbes granulométriques obtenues ;
- les particules de taille supérieure à 50 μ m sont d'une importance volumétrique trop faible (< à 8%) et peuvent, avec la fraction sableuse, être assimilées aux agrégats non dispersés par le défloculant secondaire, Dolapix, utilisé lors de l'analyse granulométrique ;
- l'échantillon KiS₅2B est le plus argileux (59%) et le moins limoneux (41%) des matériaux de Kingabwa étudiés.

Les pourcentages en argiles des matériaux de Kasangulu et de Kingabwa obtenus lors de l'analyse granulométrique par diffraction laser au Laboratoire des Matériaux de Construction (LMC-GeMMe) et en utilisant l'hexamétaphosphate de sodium (HMPNa) comme dispersant secondaire sont consignés dans le tableau n°43 et graphiquement sur les figures n° 55 et 56.

Tableau 43: Pourcentages en argiles des matériaux de Kasangulu et de Kingabwa

Sites	Echantillons	Modèle	
		Mie	Fraunhofer
Kasangulu	KaN ₁ C-2	40	20
	KaN ₁ C-3	3	12
	KaSGIC-2	22	15
	KaSGIRb	2	6
Kingabwa	KiS ₃ C-4	50	34
	KiS ₄ C-2	43	31
	KiS ₅ 2A	41	29
	KiS ₅ 2B	54	38

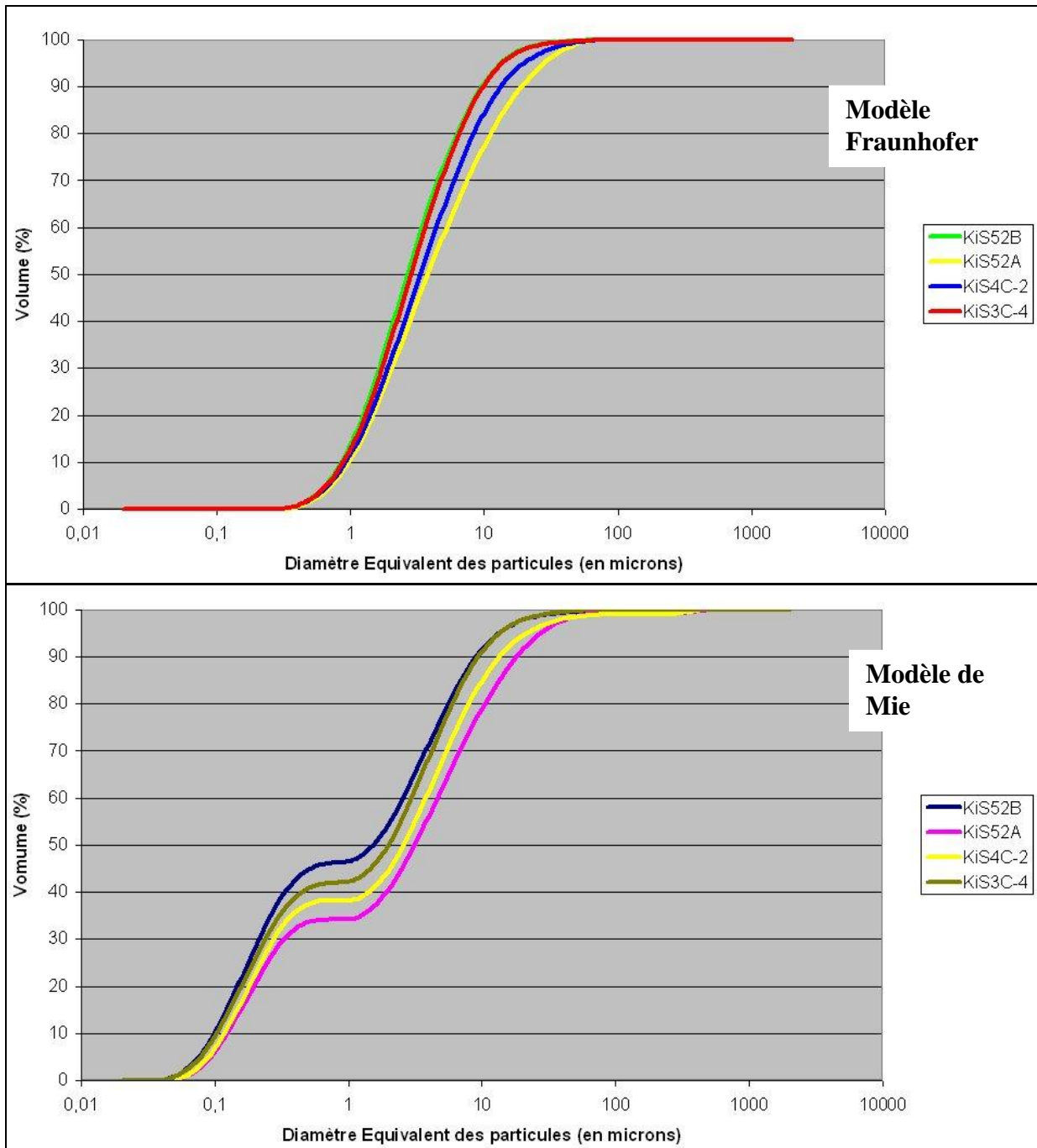


Fig. 55: Courbes granulométriques cumulatives des matériaux de Kingabwa

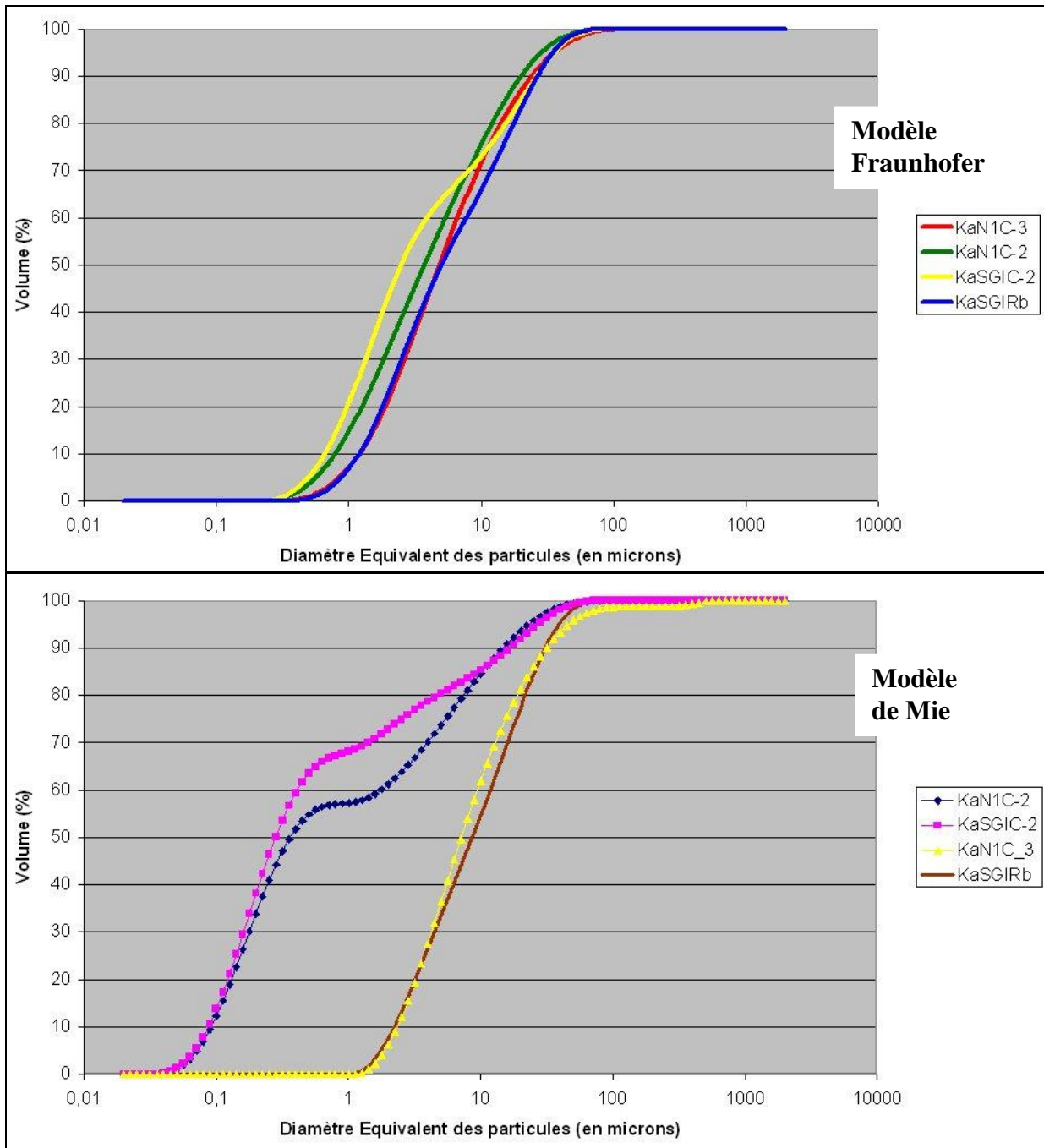


Fig. 56: Courbes granulométriques cumulatives des matériaux de Kasangulu

Le modèle Fraunhofer donne des pourcentages en argiles inférieurs par rapport aux pourcentages obtenus, pour les mêmes échantillons, par modèle Mie à l'exception des échantillons KaN_1C-3 et $KaSGIRb$.

IV.2.4.4. Granulométrie par analyse d'images

IV.2.4.4.1. Principe et matériel d'acquisition d'images

Le matériel utilisé est un granulomorphomètre Occhio 500 nano développé par la société Occhio. Associé à un logiciel Callisto.33, Occhio 500 nano sert à mesurer les tailles et à analyser la morphologie des particules à partir de 500 nm jusqu'à 2mm. Ce système est composé d'une camera CCD de haute résolution, d'un éclairage collimaté, d'une lentille télécentrique et d'un disperseur de particules.

L'échantillon sous forme de poudre a été déposé au centre d'un support plastique. Le disperseur automatique sous vide dépose délicatement des millions de grains individuels de poudre sur une lame de verre en quelques secondes tout en maintenant l'intégrité des particules sans impact sur le verre. Par son système automatique de balayage progressif d'une caméra haute résolution couplée à un objectif télécentrique et une lumière collimatée, le dispositif Occhio 500 nano est parfaitement concentré sur chaque particule individuelle grâce à une auto focus en continu lors de l'analyse. Ceci présente l'avantage de pouvoir obtenir le meilleur contraste possible des contours des particules et donc des images claires et nettes pendant l'acquisition (Fig.57).

Le logiciel callisto.33 associé au dispositif instrumental d'Occhio 500 nano comprend divers outils statistiques bien adaptés pour le traitement et la présentation des résultats dont la superposition de plusieurs caractéristiques de taille ou de forme des particules analysées, l'analyse numérique d'images étant effectuée en temps réel.

Concernant particulièrement les paramètres de tailles des particules, il est à souligner que lors de la dispersion, les particules se déposent, avec leur plus grande surface face à la camera, dans leur état le plus stable mécaniquement sur la lame de verre. Il a été montré que la sédimentation naturelle des particules donne une forte corrélation entre la distribution tenant compte du diamètre interne (inner diameter) et le sieve diameter (tamis) par le fait que la dimension la plus longue trouvée du diamètre interne est celle mesurée par le tamis (PIRARD E. et al., 2004 et 2007 ; OCCHIO, 2011).

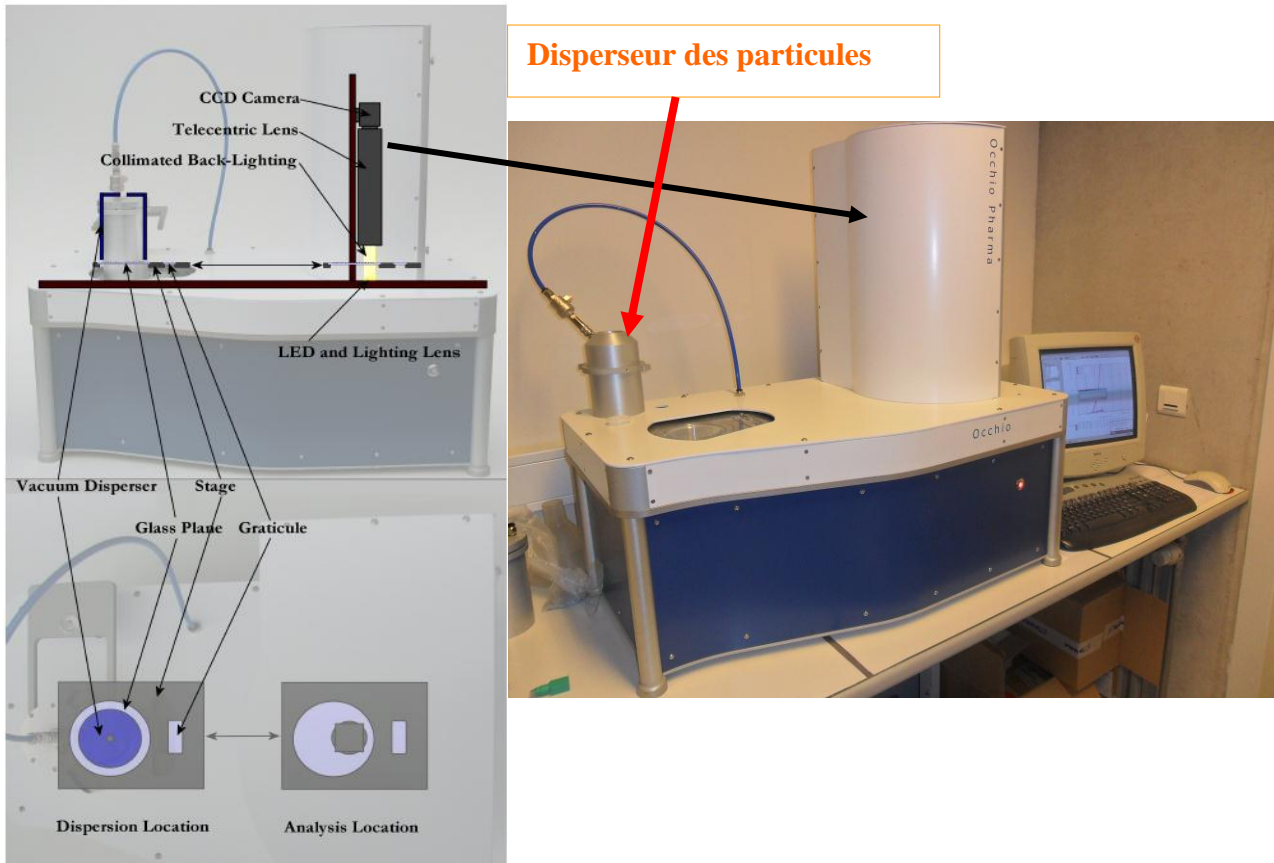


Fig. 57: Schéma du principe et matériel d'acquisition d'images

IV.2.4.4.2. Résultats et discussions

IV.2.4.4.2.1. Analyse de la distribution

Les images acquises par le principe d'éclairage collimaté sur les matériaux étudiés sont présentées en annexe (An.n°1et2). Les principaux paramètres granulométriques obtenus d'après les pourcentages volumiques du diamètre interne des particules sont consignés dans le tableau n°44. Les distributions des échantillons analysés sont représentées graphiquement sur les figures n° 58 à 60.

Tableau 44: Paramètres de la distribution d'après le diamètre interne des particules

Echantillons	Nombre des particules (Résolution)	Min. (µm)	Max. (µm)	Moy. (µm)	P ₁ (µm)	P ₁₀ (µm)	P ₅₀ (µm)
KaN ₁ C-2	157.821 (0,62µm/px)	0,6	138	58	2	9	50
KaN ₁ C-3	139.421 (0,99µm/px)	0,9	175	70	3	6	53
KiS ₃ C-4	111.752 (0,62µm/px)	0,6	102	41	2	5	36
KiS ₅ 2B	121.484 (0,62µm/px)	0,6	76	18	3	4	12

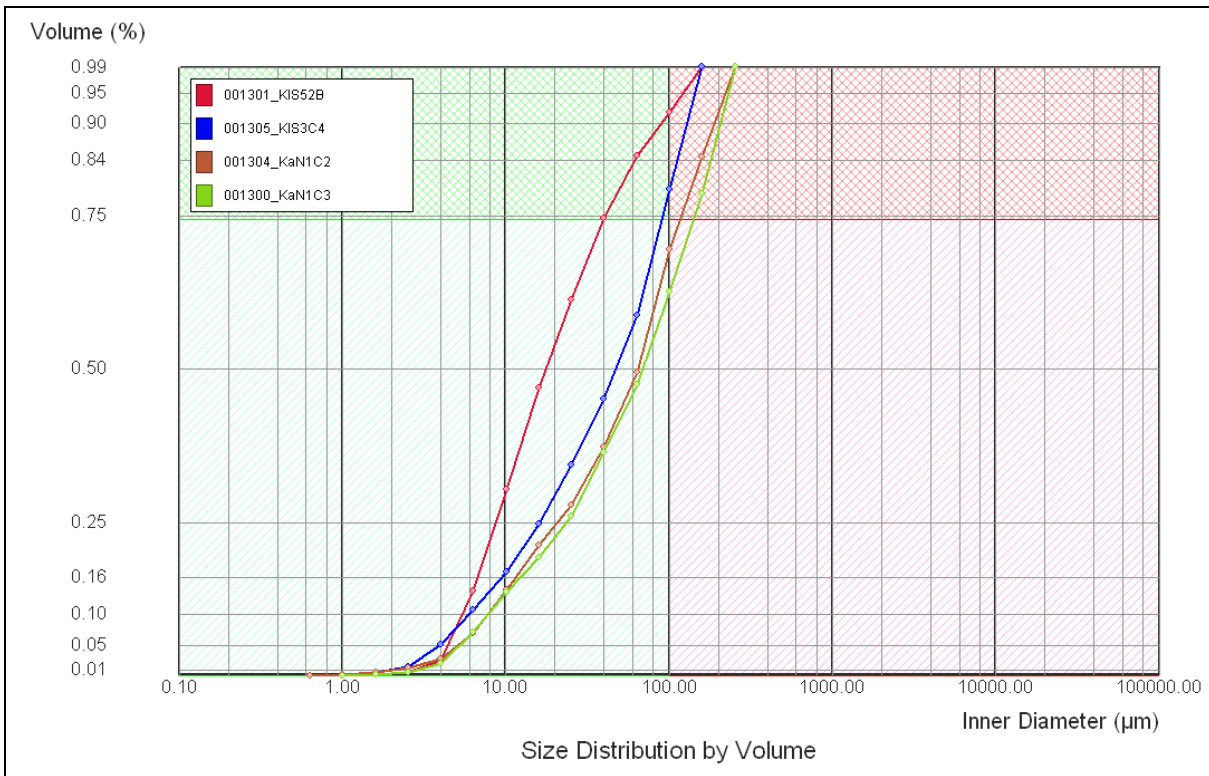


Fig. 58: Courbes cumulatives des particules des matériaux étudiés

De l'analyse des histogrammes de diamètres internes de particules, il ressort que la distribution des particules des échantillons $\text{KaN}_1\text{C-2}$, $\text{KaN}_1\text{C-3}$ et $\text{KiS}_3\text{C-4}$ est asymétrique. Ces histogrammes présentent une asymétrie négative car les queues de leurs distributions s'étirent vers les plus faibles valeurs. L'échantillon $\text{KaN}_1\text{C-2}$ présente un léger bimodalisme. Les histogrammes de diamètres internes de l'échantillon $\text{KiS}_5\text{2B}$ soulignent une distribution normale des particules.

Dans tous les cas, la précision de l'appareil de mesure Occhio 500 nano dont la limite de détection est à $0,5\mu\text{m}$ par pixel peut expliquer cette asymétrie négative. Le nombre des particules de taille $\leq 10\mu\text{m}$ pourrait encore être plus important.

La moyenne arithmétique est supérieure au percentile 50 pour tous les échantillons analysés. L'influence des valeurs extrêmes de la distribution et les éventuels agglomérats pourraient aussi être à la base de cette inégalité. Avec un P_{50} égale à $12\mu\text{m}$ d'après les pourcentages volumiques du diamètre interne, le matériau argileux de Kingabwa et plus particulièrement le faciès $\text{KiS}_5\text{2B}$ est le plus fin de la série.

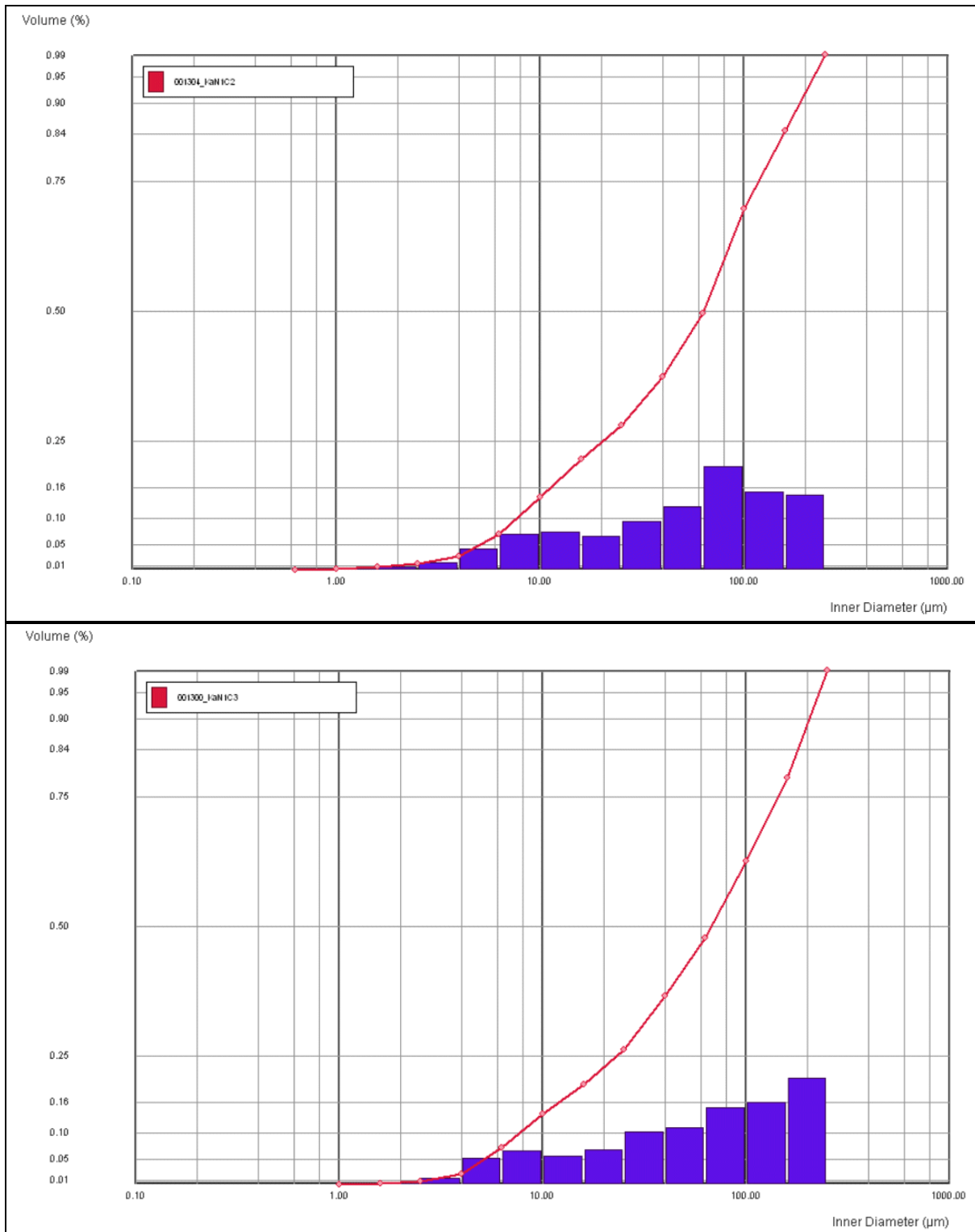


Fig. 59: Distribution granulométrique des particules des matériaux de Kasangulu

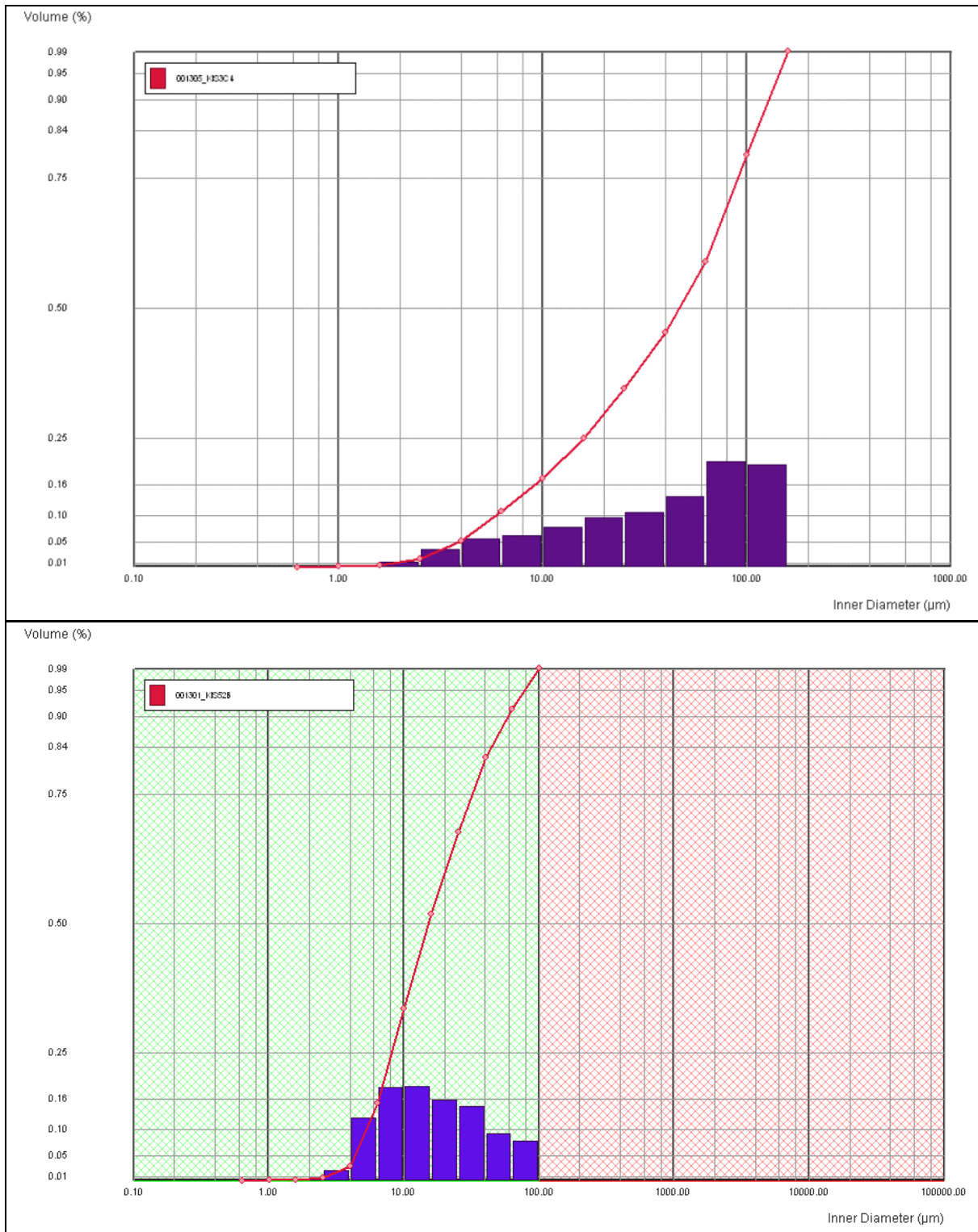


Fig. 60: Distribution granulométrique des particules des matériaux de Kingabwa

IV.2.4.4.2.2. Analyse de la taille et de la forme des particules

La figure n°61 donne une illustration de quelques paramètres de tailles de particules pouvant composer un matériau (HART J.R. et al., 2011 ; OCCHIO, 2011).

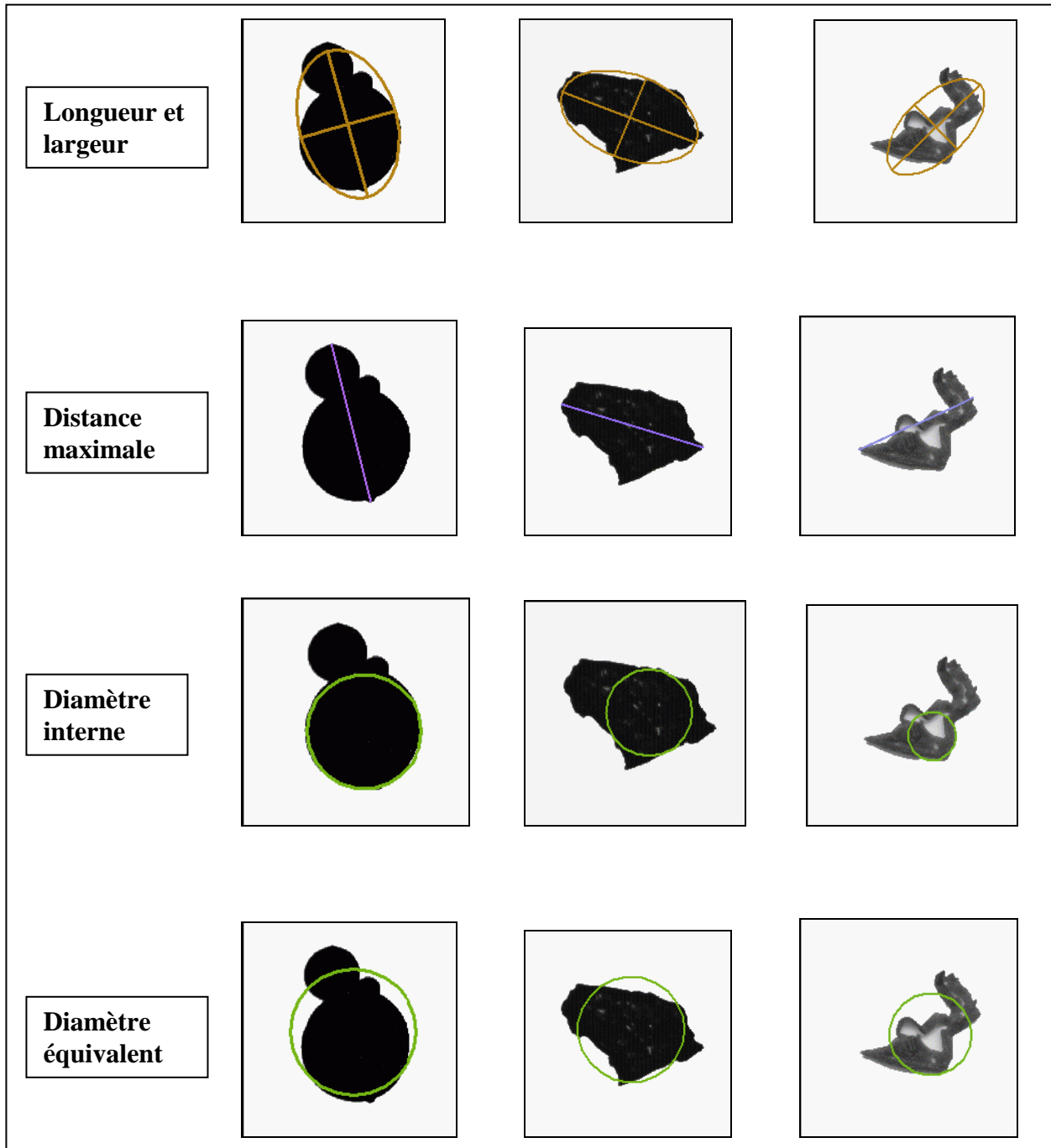


Fig. 61: Définition de paramètres de tailles de quelques particules (OCCHIO, 2011)

Dans un matériau naturel, les particules constitutives peuvent développer plusieurs formes dont (HART J.R. et al., 2011 ; OCCHIO, 2011):

- la luminance : luminosité relative de la particule éclairée ; 0% correspond à une particule noire et 100% à une particule blanche ;
- l'élongation : rapport de la largeur sur la longueur. Un disque a une élongation de zéro et une fibre une élongation approchant 100% ;
- la circularité : rapport du diamètre équivalent en périmètre (diamètre d'un cercle ayant le même périmètre que la particule) par le diamètre équivalent en aire (diamètre d'un cercle ayant la même aire que la particule) ;
- la solidité : rapport de l'aire de la particule par l'aire convexe, aire convexe étant l'aire définie par un élastique placé autour de la particule ;
- la rugosité : quantité de matière à retirer à une particule pour qu'elle ait une surface lisse ;
- l'émoissé : degré d'évolution d'une particule dans un processus d'abrasion ou de transport.

Les figures n° 62 à 64 et les annexes n°3 et 4 présentent les caractéristiques de tailles et de formes de particules constitutives des matériaux naturels de deux sites pilotes d'étude.

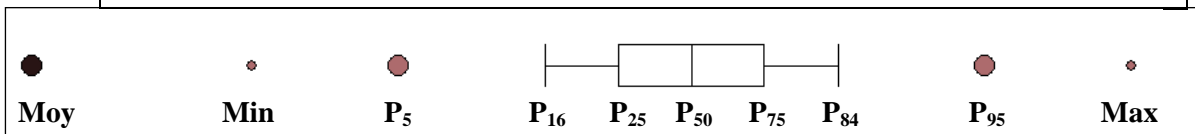
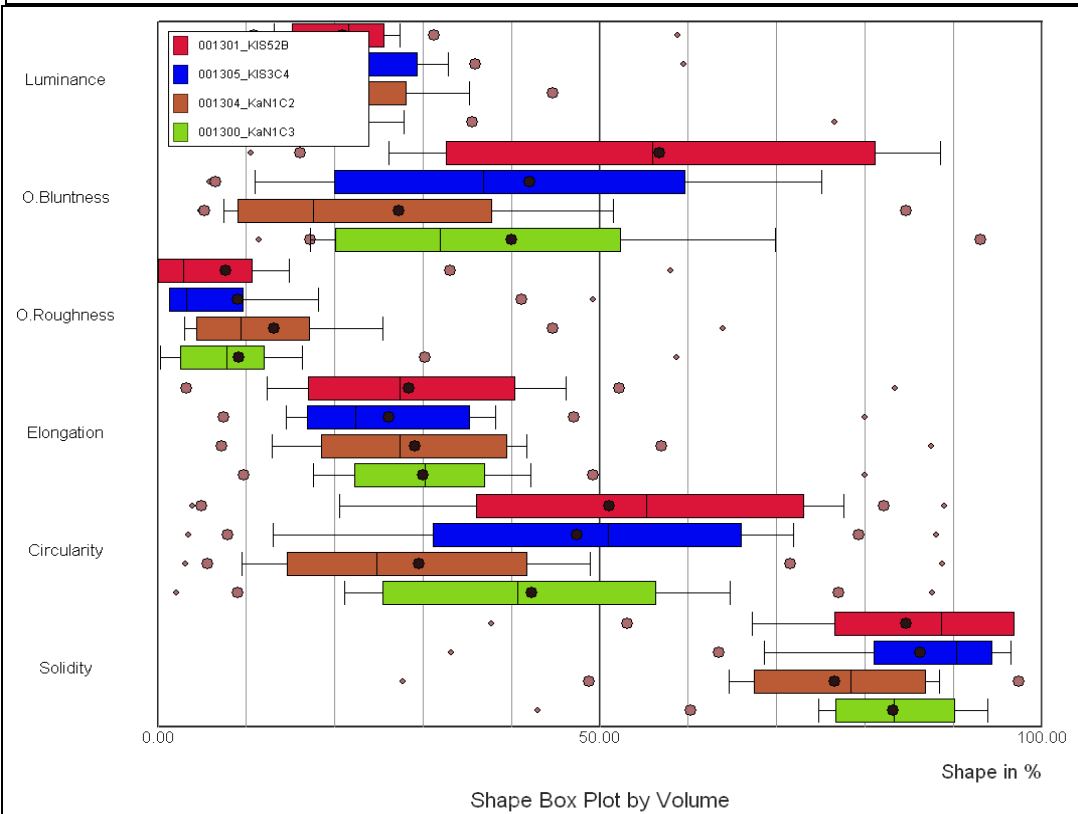
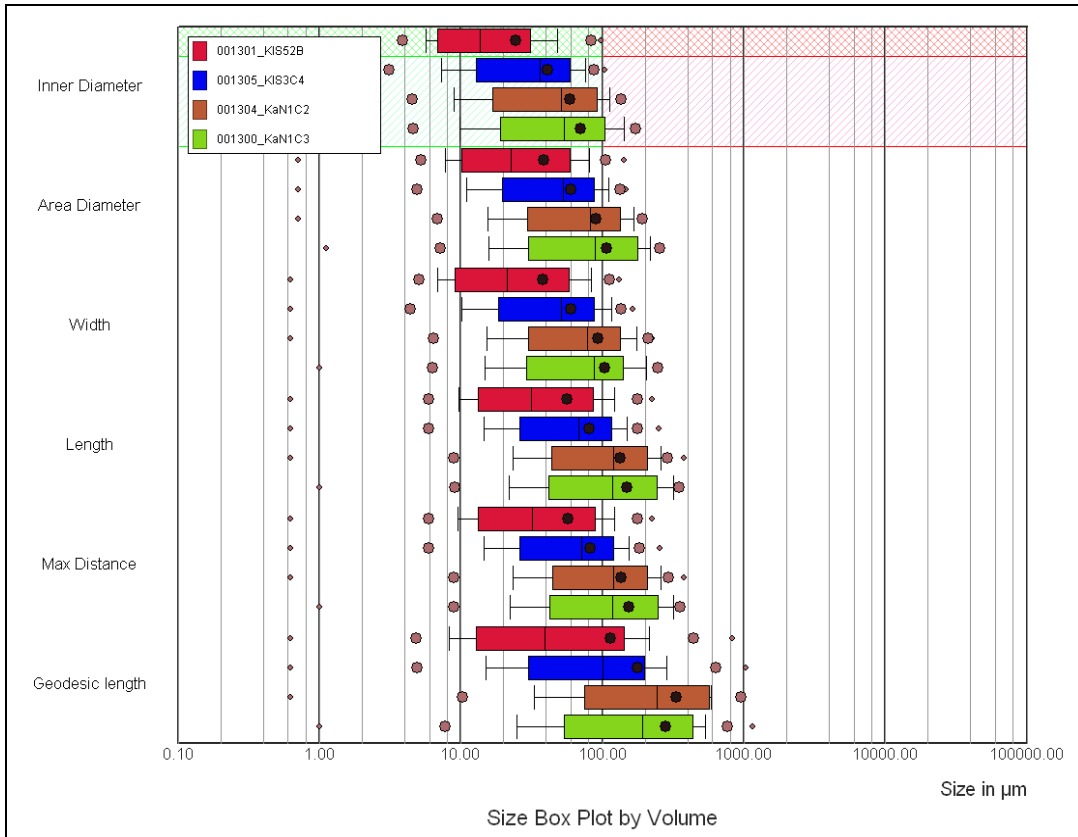


Fig. 62: Paramètres de la taille et de la forme des particules de matériaux naturels

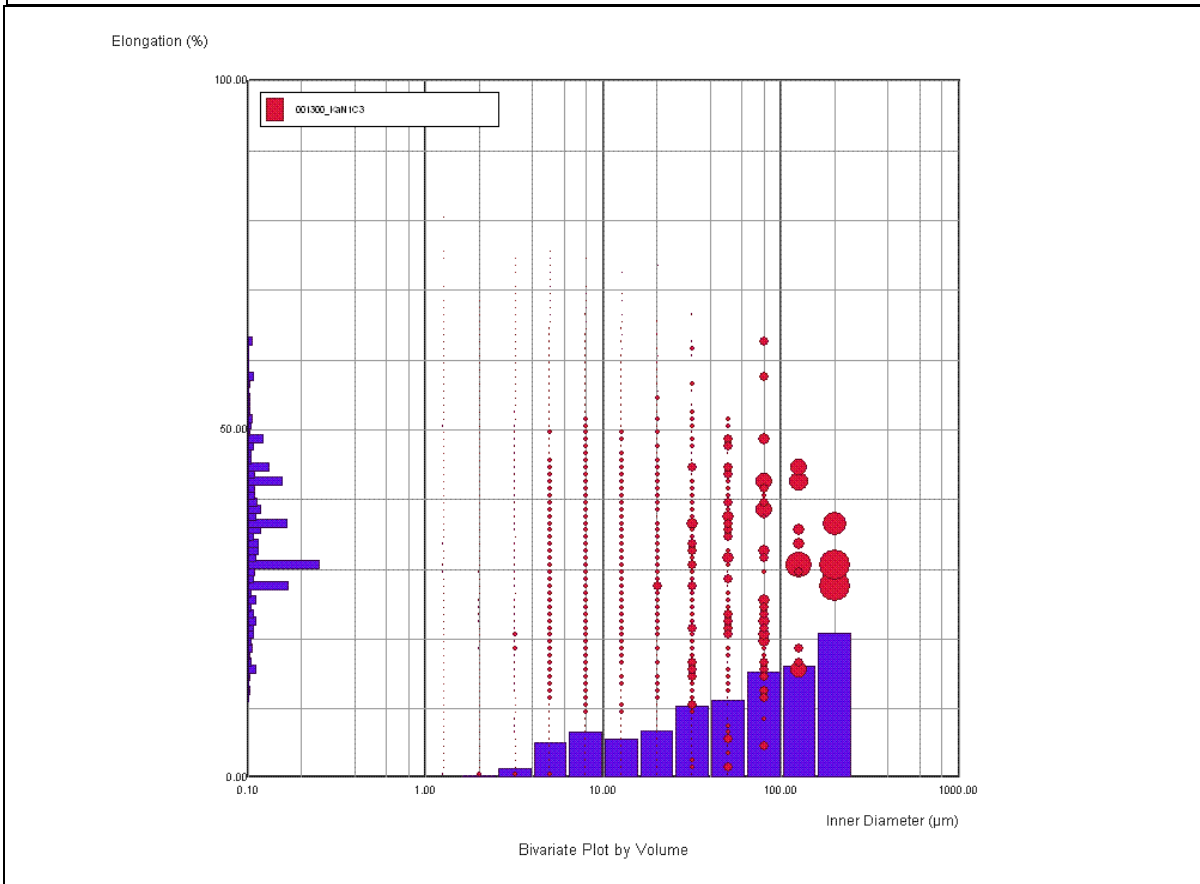
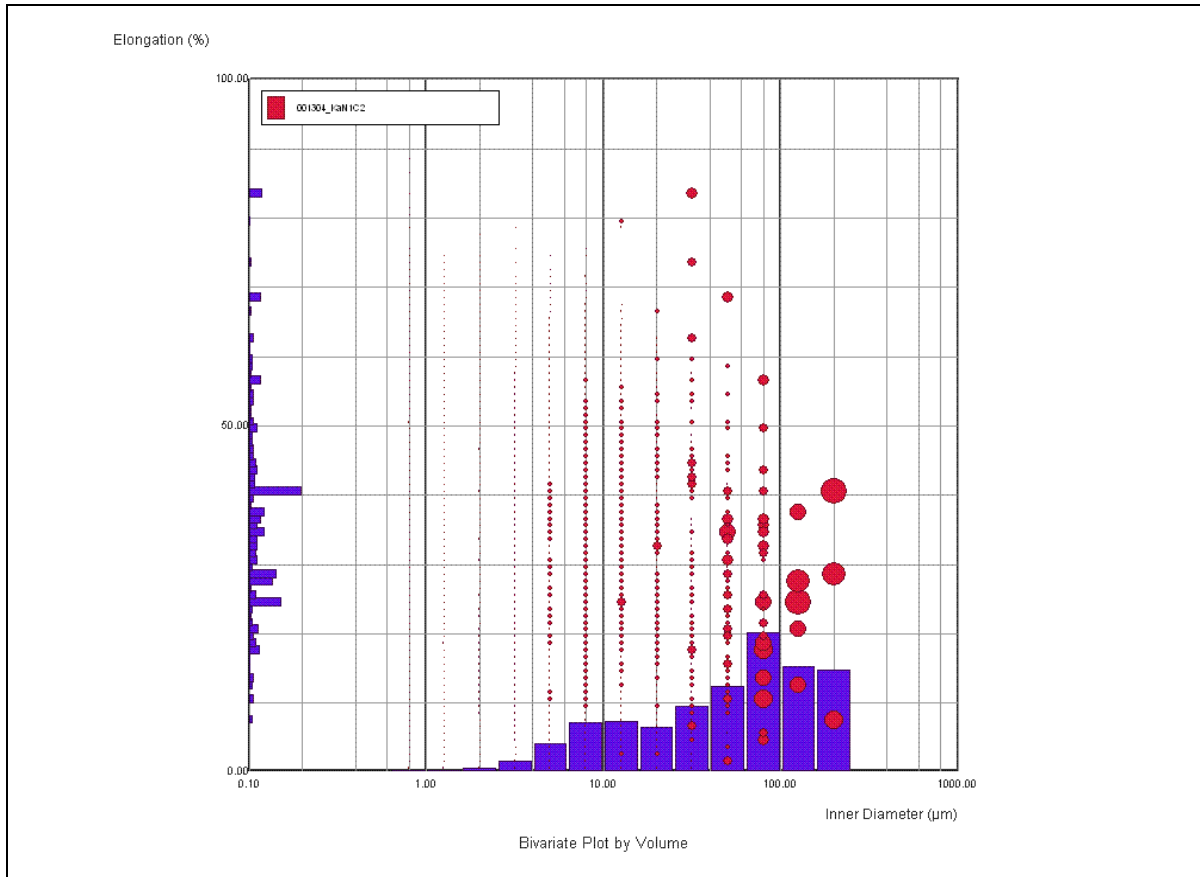


Fig. 63: 2D Box plot (élongation-diamètre interne) des matériaux de Kasangulu

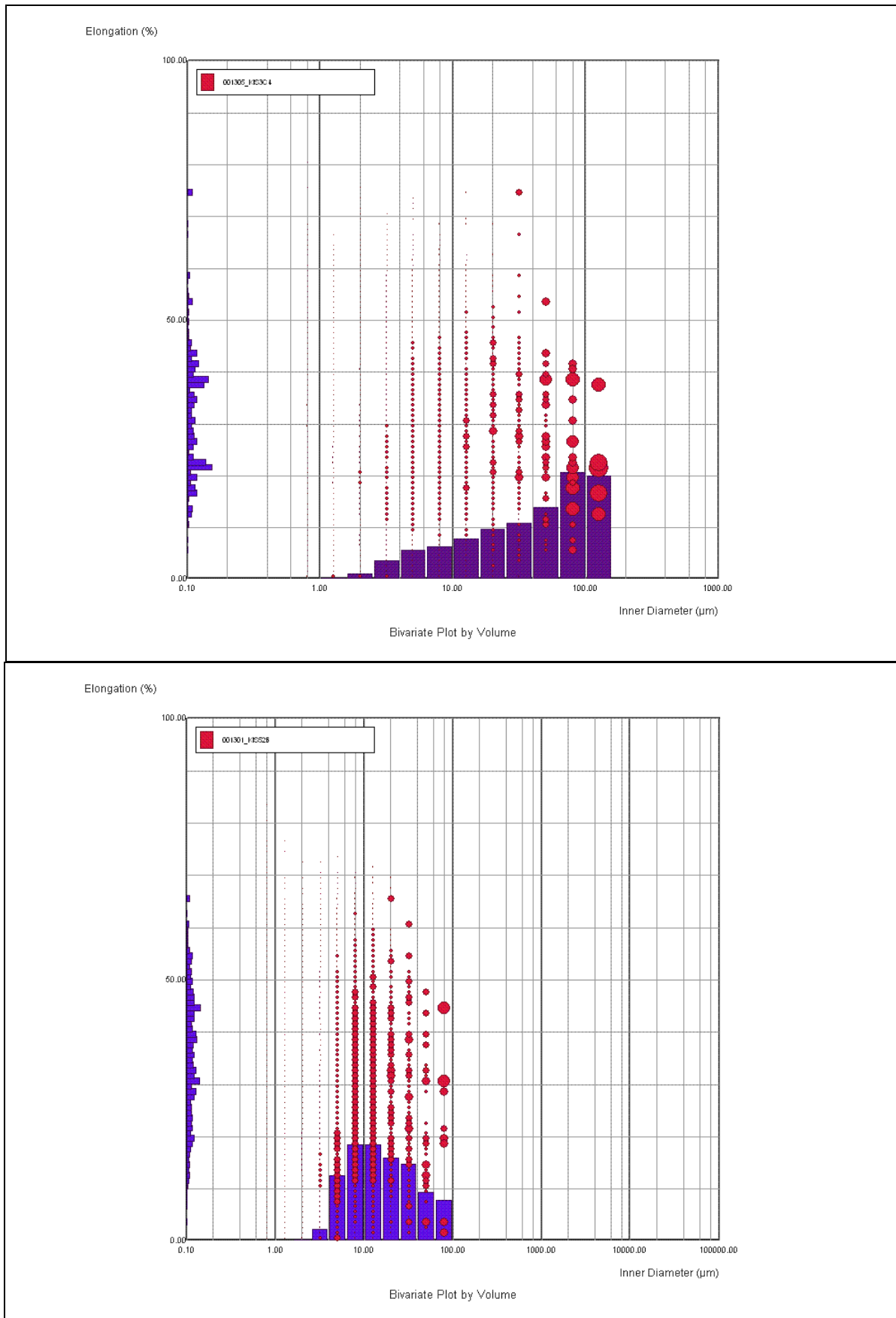


Fig. 64: 2D Box plot (élongation-diamètre interne) des matériaux de Kingabwa

Les valeurs moyennes de tous les paramètres de tailles des particules de matériaux de Kasangulu sont plus élevées que celles de matériaux plus fins de Kingabwa.

La valeur moyenne en émoussé, rugosité et en circularité des matériaux analysés est supérieure à celle de P_{50} exceptée l'élongation et la solidité de KaN₁C-3 où la moyenne est égale au P_{50} et la circularité de KiS₅2B (Moy > P_{50}). Le P_{50} en élongation de KiS₅2B est situé vers les plus faibles valeurs.

On note que les moyennes et les P_{50} des caractéristiques de forme : solidité, circularité et de l'émoussé des matériaux de Kingabwa sont plus élevées que celles des matériaux de Kasangulu. Par contre, la rugosité et l'élongation montrent des valeurs plus importantes pour les matériaux argileux de Kasangulu par rapport à ceux de Kingabwa.

Ces constatations s'accordent bien avec les observations faites au microscope électronique à balayage (en électrons secondaires), lesquelles ont mis en évidence les feuillets de kaolinites sous forme des pages d'un livre dans les matériaux de Kasangulu et les plaquettes assez régulières de ce même minéral argileux dans les faciès de Kingabwa. Ceci laisse penser au fait que les matériaux de Kingabwa peuvent avoir subi un transport assez long par rapport à ceux de Kasangulu qui n'ont subi que peu ou pas de transport après leurs formations.

IV.2.4.5. Discussions et comparaison des résultats de différentes méthodes

Les techniques d'analyse granulométrique classiques (tamisage +sédimentométrie) et par diffraction laser (modèles Mie et Fraunhofer) ont été utilisées et ont fait recours à l'usage de deux dispersants secondaires, le polymétacryllate d'ammonium et l'hexamétaphosphate de sodium, pour caractériser les matériaux argileux de la Région de Kinshasa.

Le tableau n°45 présente la synthèse des résultats granulométriques de la fraction argileuse obtenue par ces différentes méthodes analytiques.

Tableau 45: Comparaison des pourcentages en argiles des différentes techniques

Echantillons	Sédimentométrie	Laser (HMPNa)		Laser (Dolapix)
		Mie	Fraunhofer	Mie
KaSGIC-2	22	22	15	22
KaN ₁ C-2	45	40	20	32
KaN ₁ C-3	21	3	12	4
KaSGIRb	4	2	6	2
KiS ₃ C-4	76	50	34	50
KiS ₄ C-2	70	43	31	40
KiS ₅ 2A	61	41	29	42
KiS ₅ 2B	78	54	38	59

Ce tableau fait ressortir que pour les deux techniques granulométriques et les dispersants utilisés:

- l'ordre de grandeur est globalement semblable quant au pourcentage en argile des échantillons analysés et se présente comme suit :

*KaSGIRb<KaN₁C-3<KaSGIC-2<KaN₁C-2 pour les matériaux de Kasangulu ;

*KiS₅2A<KiS₄C-2<KiS₃C-4<KiS₅2B pour les matériaux de Kingabwa. Ces derniers montrent quand même une petite variation pour l'échantillon KiS₅2A qui a titré un peu plus d'argile (42%) que celui de KiS₄C-2 (40%) par usage du polymétacryllate d'ammonium ;

- les teneurs en argiles sont quantitativement et significativement très différentes : la sédimentométrie a donné des teneurs trop élevées en argiles alors que la diffraction laser par le modèle Fraunhofer utilisant le défloculant d'hexamétaphosphate de sodium a conduit aux pourcentages en argiles largement inférieurs sauf pour les échantillons KaN₁C-3 et KaSGIRb.

Les différences observées dans les résultats de la granulométrie par sédimentométrie et la diffraction laser utilisant le polymétacryllate d'ammonium sont reprises graphiquement sur la figure 65.

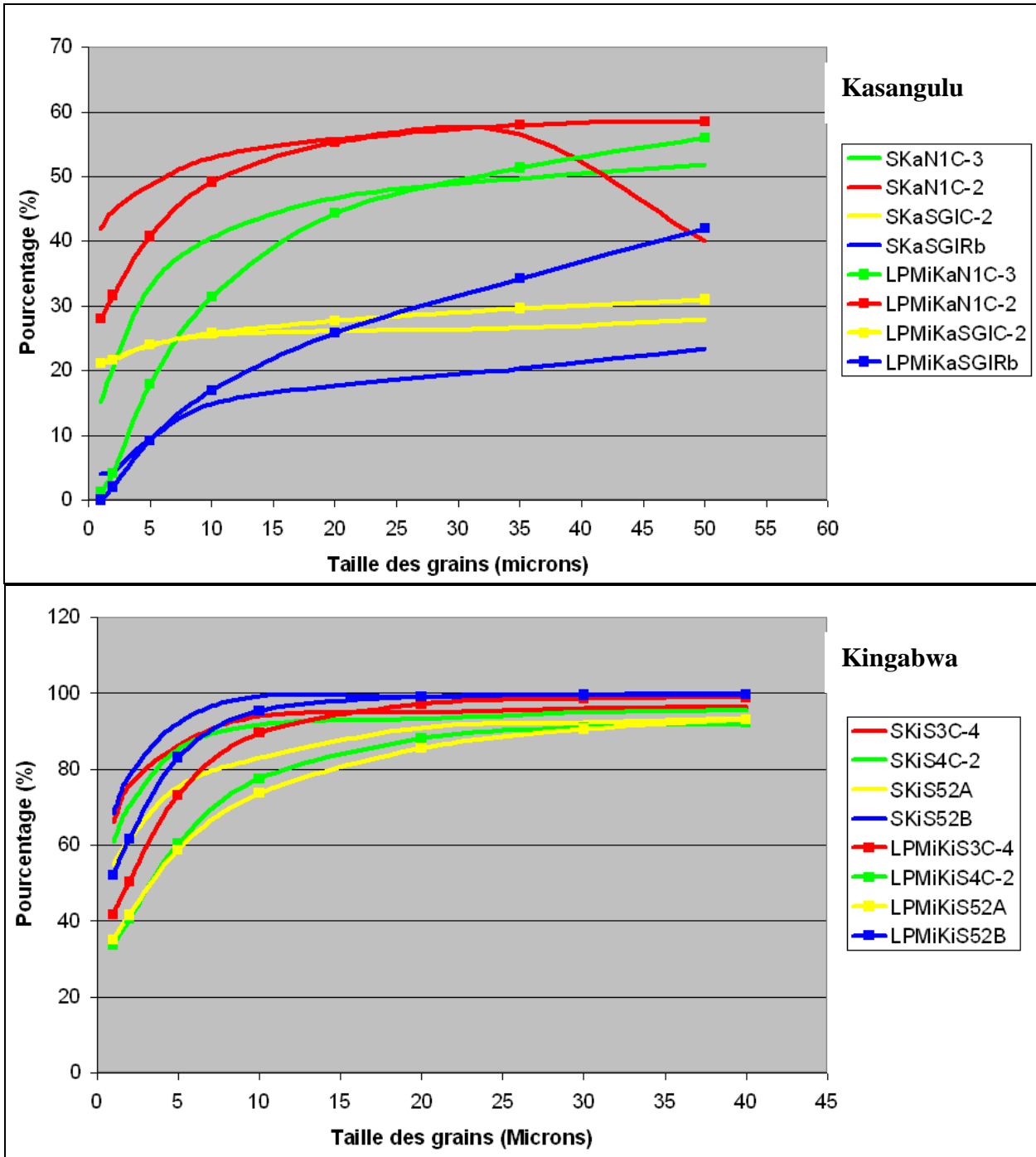


Fig. 65: Différences observées entre les résultats de la sédimentométrie et diffraction laser (S = Sédimentométrie ; L = Laser ; P= Polymétacryllate d'ammonium ; Mi = Modèle Mie)

Ces variations de teneurs en argiles dans les échantillons analysés peuvent être attribuées aux facteurs ci-après (CRAMP A. et al., 1997 ; MEYER A., FISHER A., 1997 ; RAWLE A., 2001 ; BAOPING WEN et al., 2002) :

- la forme et la dimension des grains composants les matériaux ;
- la présence des allophanes dans les matériaux analysés ;
- et éventuellement la nature et l'efficacité des dispersants secondaires utilisés.

En effet, l'analyse granulométrique par sédimentométrie fait recours à la loi de Stokes qui est valide dans le cas d'un écoulement laminaire pour des particules sphériques de densité fixe c'est-à-dire possédant une morphologie plus compacte pour une surface ou un volume défini. Une particule à morphologie moins définie possédera une surface plus élevée que celle de la sphère correspondante et chutera donc avec une vitesse moindre que la vitesse théorique.

Les particules argileuses sont généralement aplaties et très rarement sphériques. Cette caractéristique morphométrique, forme aplatie, de grains composant les matériaux analysés aurait beaucoup influé sur la vitesse de sédimentation conduisant ainsi à des grandes variations observées entre la réalité et les résultats obtenus par la sédimentométrie. De plus, lorsqu'on est en présence des petites particules, de taille argileuse, la loi de Stokes n'est plus la seule loi régissant la chute des particules mais le mouvement Brownien prend de plus en plus d'importance.

De la même manière, il a été montré que la technique basée sur la sédimentation des particules dans un liquide de viscosité connue selon la loi de Stokes surestime le pourcentage argileux d'un échantillon à cause de l'interaction particule-particule, de l'effet de la morphologie aplatie des particules et de la densité des particules fines.

L'analyse par diffraction des rayons X (voir plus loin) des matériaux de la région de Kinshasa et environs a indiqué la prédominance des argiles kaolinitiques dans tous les échantillons et d'autant plus importante dans le site pilote de Kingabwa.

Il résulte de ces observations que la taille et la forme des particules couplée à la nature minéralogique dominée par la kaolinite sont donc susceptibles d'expliquer les grandes variations de teneurs en argiles obtenues par la granulométrie classique et par diffraction laser des matériaux étudiés (Fig.66 à 68). Ces derniers, à l'exception de deux échantillons de Kasangulu (KaN₁C-3 et KaSGIRb), montrent des pourcentages en particules de taille inférieure à 0,1µm assez considérables obtenus seulement par un des modèles, celui de Mie, de la diffraction laser. Pour ces types de particules dont la taille est moins de 40 fois plus grosse que la longueur d'onde utilisée (430nm pour laser bleu, 660nm pour le rouge), la théorie de Fraunhofer n'est pas fiable et donc pas applicable.

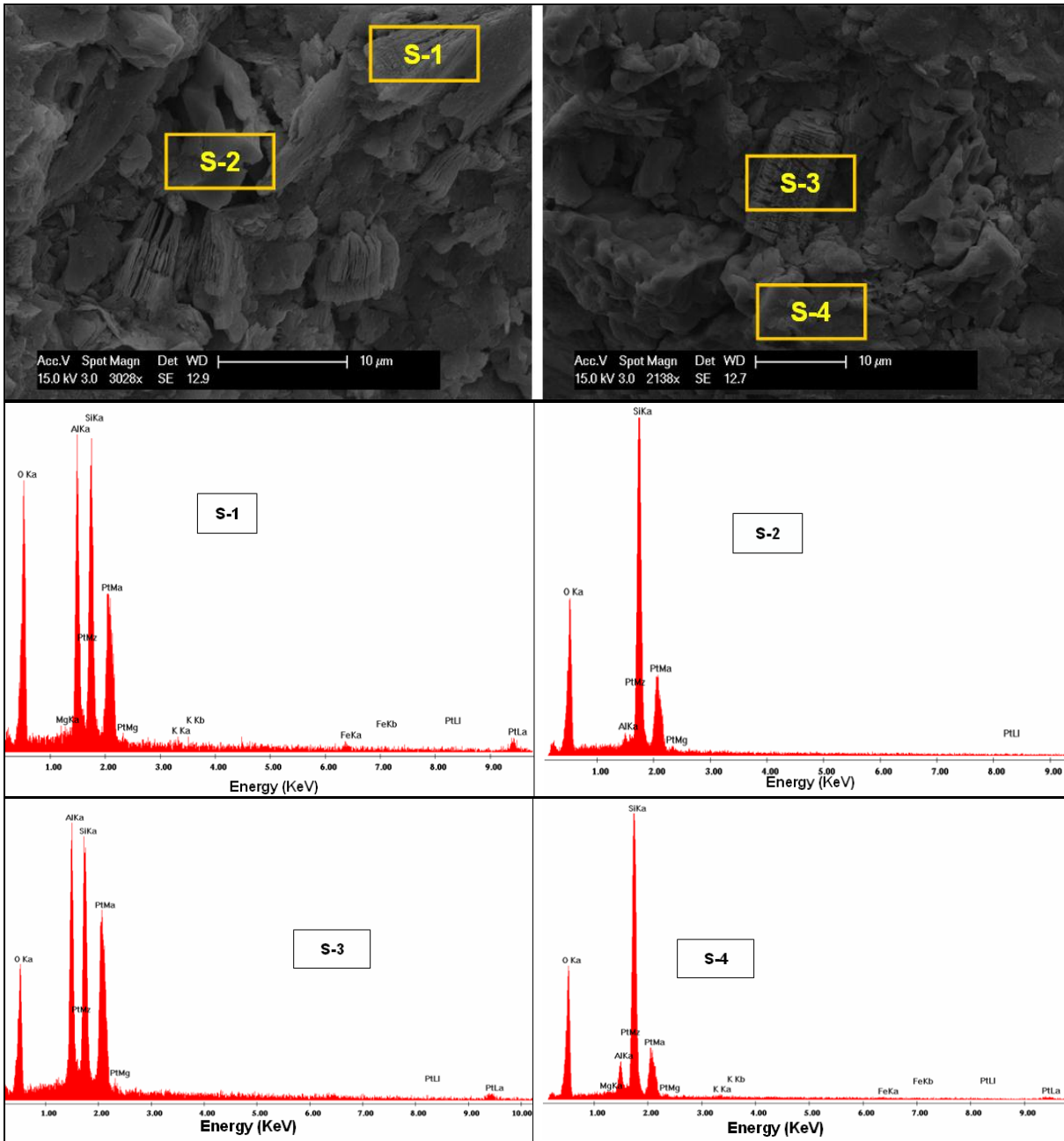


Fig. 66: Microphotographies de MEB (Electrons secondaires) de KaN1C-3 et spectres associés

- Empilements des plaquettes hexagonales de la kaolinite constituées de feuillets individuels qui rappellent les pages d'un livre (S-1 et S-3) ;
- Cristaux de quartz (S-2 et S-4).

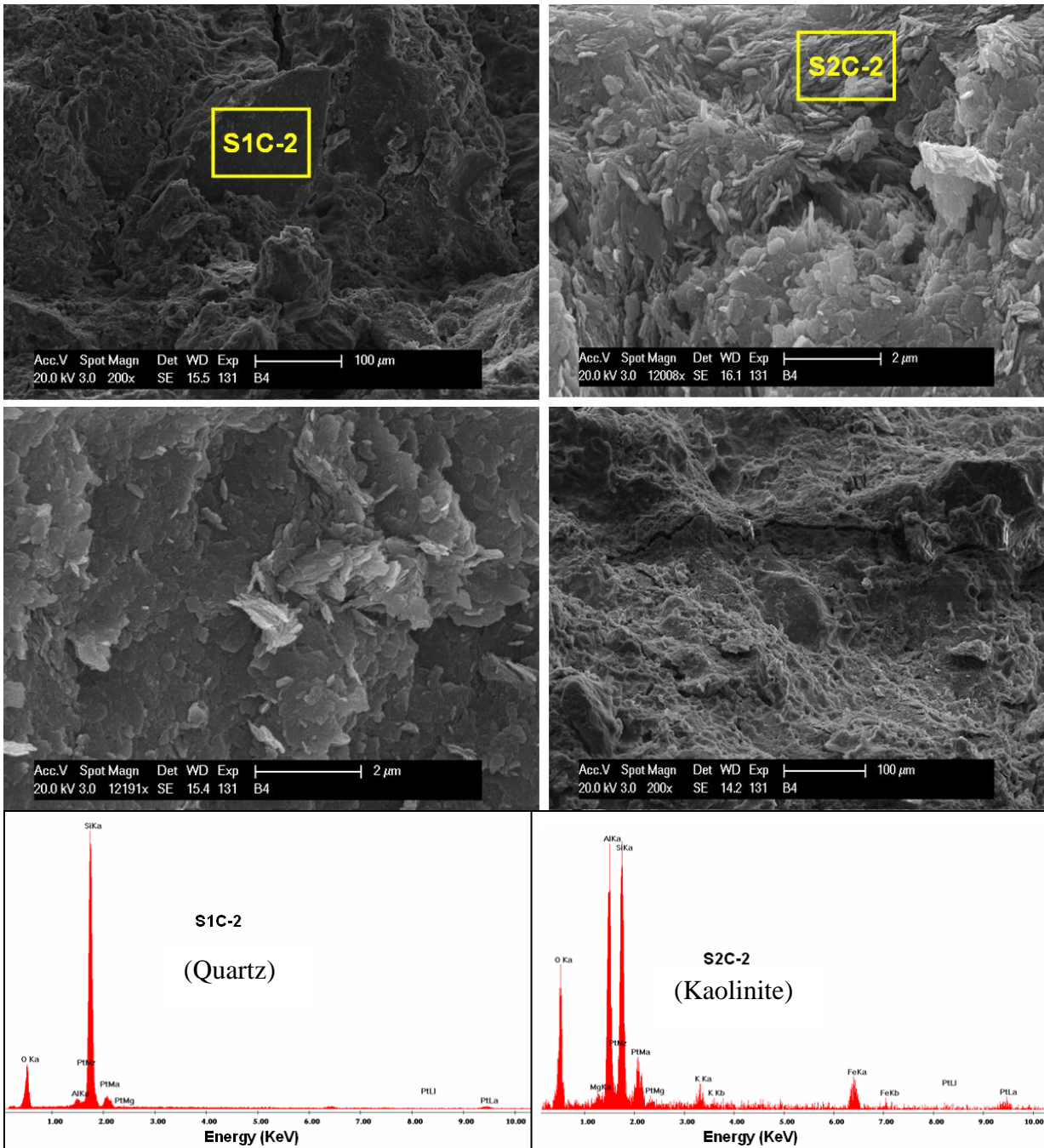


Fig. 67: Microphotographies de MEB (Electrons secondaires) de KaN1C-2 et spectres associés

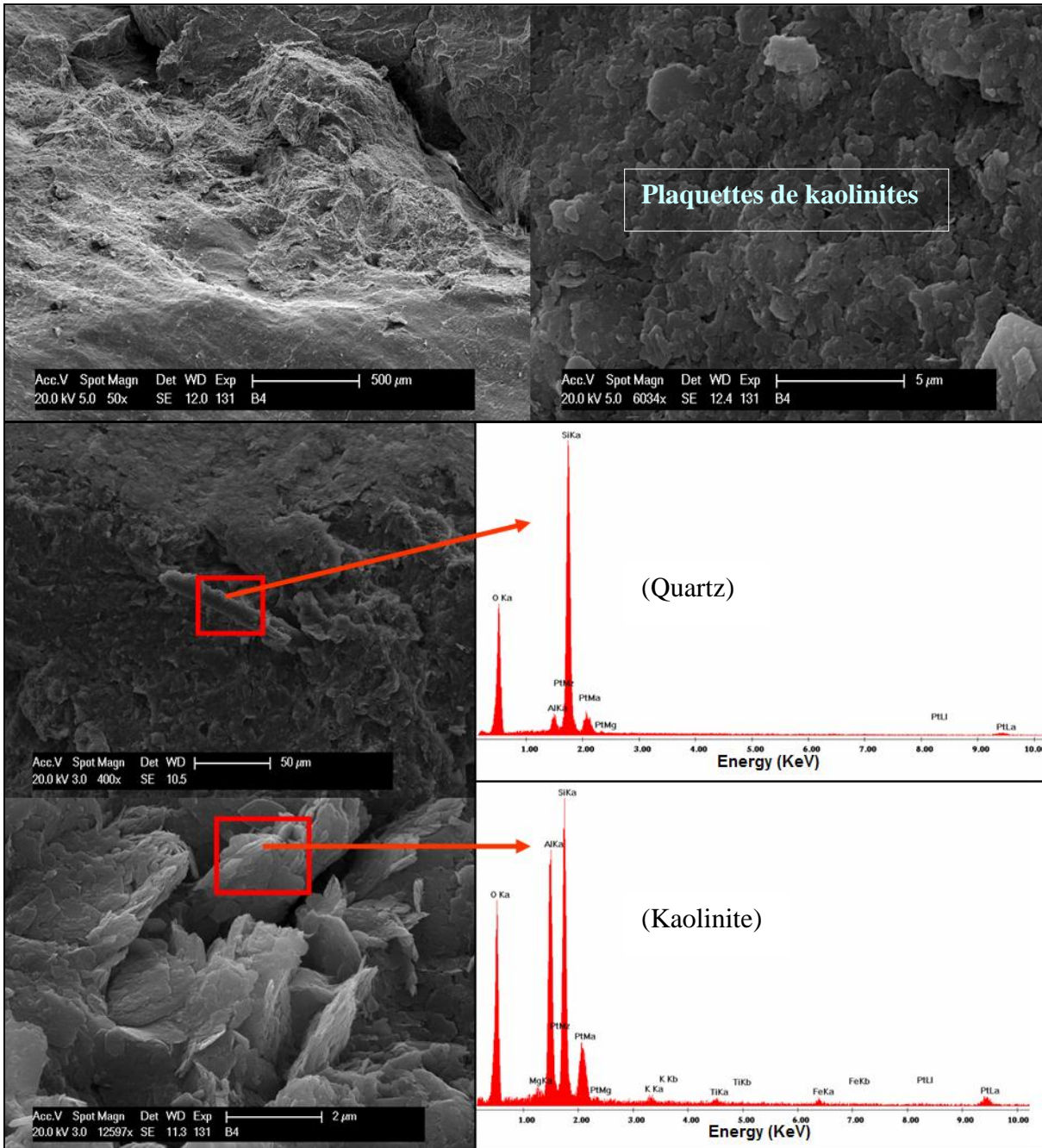


Fig. 68: Microphotographies de MEB (Electrons secondaires) de KiS52B et spectres EDS associés

Par ailleurs, du fait de la présence d'allophanes qui ont la propriété de faire flocculer les polyphosphates, QUANTIN P. (1972) déconseille l'utilisation de l'hexamétaphosphate de sodium (calgon) dans le cas des échantillons provenant d'andosols (SIEFFERMANN G. et al., 1968 ; HETIER et al., 1977).

En synthèse, on peut dire que les trois techniques d'analyse granulométriques utilisées sont complémentaires et présentent des résultats quantitatifs assez différents du fait que chacune d'elles est basée sur un principe physique différent de l'autre. En effet, vues par analyse d'images, les particules non sphériques,

allongées et présentant des anfractuosités, dans les matériaux naturels de deux sites pilotes, influencent beaucoup les résultats de l'analyse granulométrique classique (sédimentométrie) et par diffraction laser :

- le tamisage et la sédimentométrie, bien que favorisant la fraction fine, constituent des techniques granulométriques classiques faisant recours aux matériels très simples, moins coûteux et donc disponibles même dans les pays qualifiés de pauvre ;
- permettant une acquisition rapide des résultats, la technique de l'analyse granulométrique par diffraction laser, basée uniquement sur des modèles théoriques, donne des résultats très intéressants si le matériau analysé est formé de particules sphériques peu ou non hétérogènes ;
- le granulomorphomètre Occhio 500 nano a révélé quelques avantages supplémentaires car, en analysant chaque particule individuellement (réalité physique du matériau), cette technologie :
 - élimine les effets de perspectives et les aberrations optiques ;
 - permet de faire des mesures qui ne sont pas dépendantes de la distance de la particule par rapport à l'objectif étant donné que les rayons sont parallèles et donc une très bonne résolution du contraste des bords de la particule analysée ;
 - est associé à un logiciel efficace de traitements statistiques de données relatives à la forme et à la taille de particules avec des possibilités, le cas échéant, de créer des filtres adéquats.

Mais du fait de sa limite de détection à $0,5\mu\text{m}$ par pixel, les plus fines particules ne sont pas totalement visibles surtout lorsqu'on étudie des matériaux argileux. A cela s'ajoute aussi le problème d'efficacité de la dispersion des particules.

Pour toutes ces raisons, les résultats du modèle de Mie de la diffraction laser utilisant le polymétacryllate d'ammonium (Dolapix) comme dispersant secondaire sont considérés comme plus fiables pour la quantification de fractions granulométriques des matériaux étudiés dans ce travail. Les caractéristiques morphologiques déterminées par l'analyse d'images sur ces matériaux sont également fiables et moins critiques.

IV.2.4.6. Intérêt technologique de la granulométrie

Tenant compte de la composition granulométrique des échantillons analysés, les observations ci-après se dégagent en ce qui concerne l'utilisation industrielle des matériaux analysés :

- les matériaux du site pilote de Kingabwa qui sont constitués de plus de 92% de particules dont le diamètre est inférieur à 50µm avec une fraction sableuse négligeable (trop faible), inférieure à 8%, conviennent pour être utilisés dans la filière de la céramique fine ;
- bien que rentrant pas totalement dans des fuseaux optimaux recommandés pour l'obtention des produits finis d'excellente qualité, les matériaux du second site pilote, Kasangulu, peuvent quant à eux, servir des matières premières pour la fabrication des briques stabilisées ou cuites moyennant quelques corrections. Ces dernières consistent au mélange des matériaux des couches C-2 et C-3 dans le but d'améliorer la résistance des produits finis qui en résulteront et de limiter l'usage de grandes quantités de stabilisants (NJOPWOUO D. et al., 1994).

Les proportions de quatre mélanges types optimisés au laboratoire sur un total de 10gr de matériaux naturels sont :

- KaN₁C-2 (70%) + KaN₁C-3 (30%) ;
- KaN₁C-2 (60%) + KaN₁C-3 (40%) ;
- KaN₁C-2 (60%) + KaSGIC-2(40%) ;
- KaN₁C-2 (50%) + KaSGIC-2(50%).

Ces échantillons de mélange ainsi produits sont analysés au granulomètre laser Mastersizer 2000 sur modèle Mie en utilisant Dolapix comme dispersant secondaire. Les résultats obtenus se présentent de la manière suivante (Tabl.46 et Fig.69).

Tableau 46: Composition granulométrique des échantillons de mélange

Echantillons	Argiles (%)	Limons (%)	Sables fins (%)	Sables grossiers (%)	d<10µm (%)
KaN ₁ C-2 (70%) + KaN ₁ C-3 (30%)	25	33	17	25	42
KaN ₁ C-2 (60%) + KaN ₁ C-3 (40%)	17	25	23	35	30
KaN ₁ C-2 (60%) + KaSGIC-2(40%)	32	23	25	19	44
KaN ₁ C-2 (50%) + KaSGIC-2(50%)	31	20	24	25	42

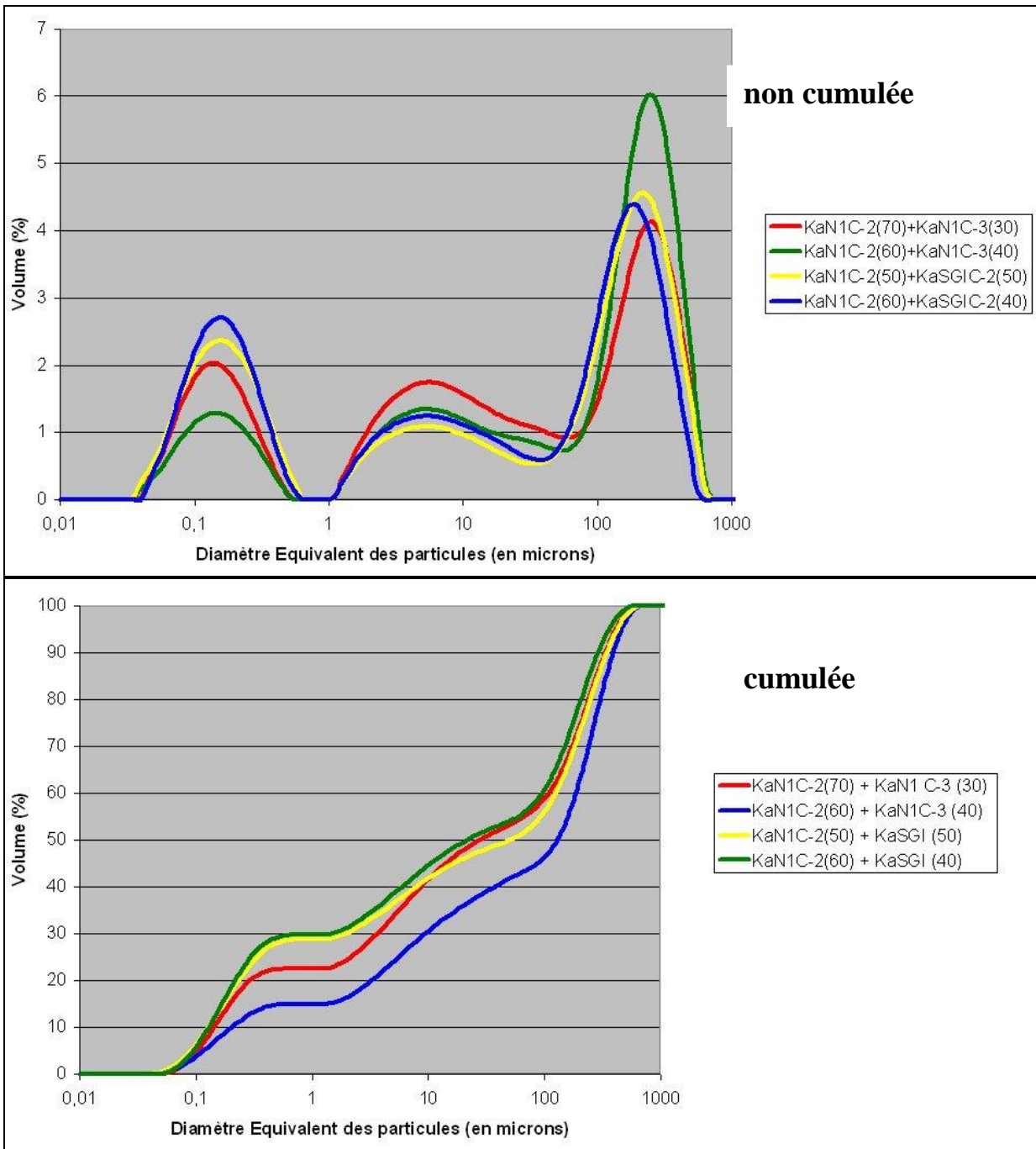


Fig. 69: Distribution des particules dans les matériaux de mélange (Dolapix ; Modèle Mie)

La stabilisation au ciment des matériaux de deux premiers mélanges donnerait des produits finis de bonne qualité mécanique ; la chaux peut être utilisée avec plus d'efficacité comme liant pour les deux derniers mélanges de matériaux naturels.

Les fractions granulométriques des échantillons individuels et de quatre mélanges types sont projetées dans un diagramme ternaire ci-dessous (WINKLER, H.G.F., 1954 ; NYAKAIRU G.W.A. et al., 2002) (Fig.70).

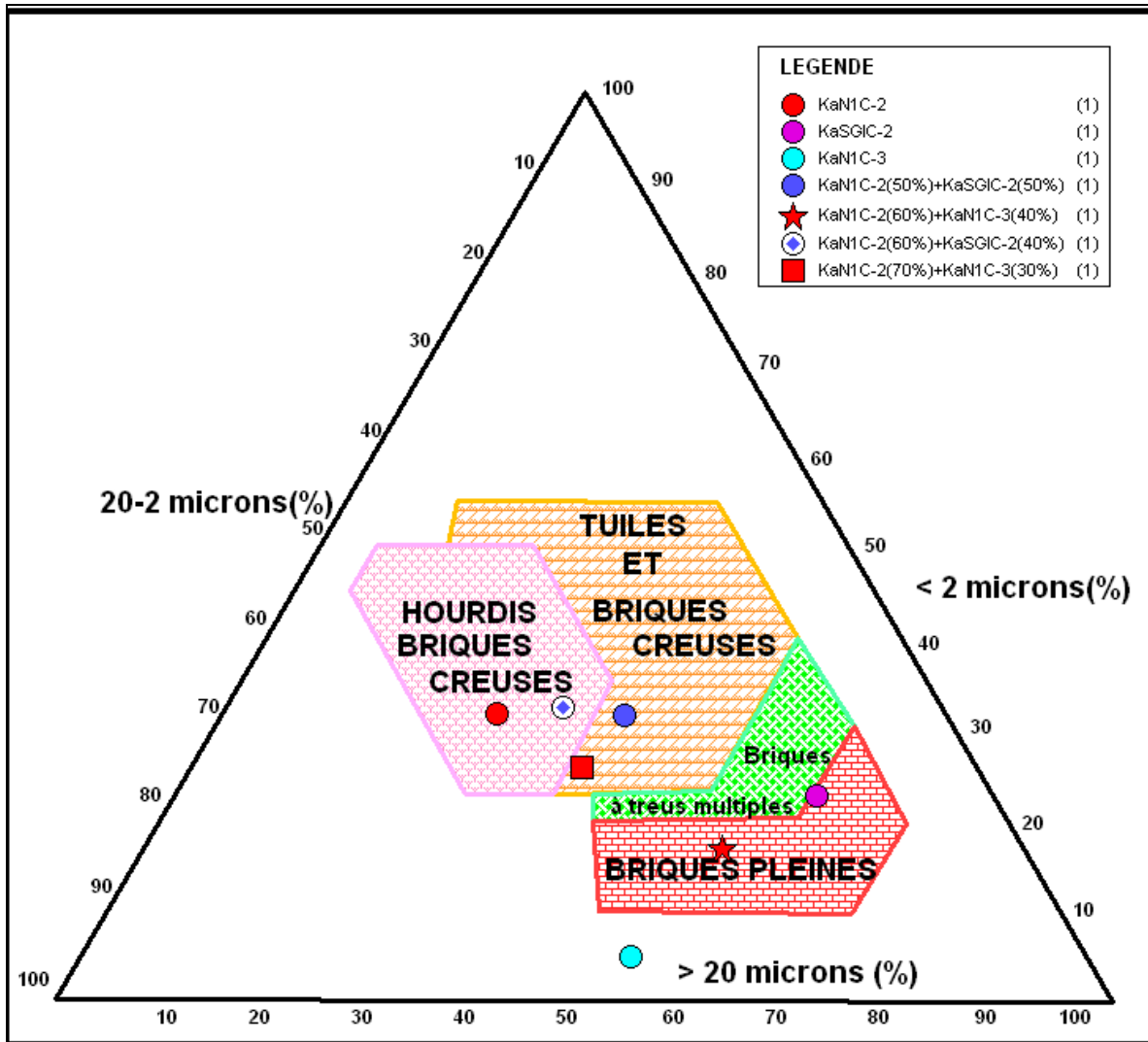


Fig. 70: Diagramme ternaire de granulats et leurs aptitudes à la fabrication des produits finis

Ce diagramme montre à suffisance que les matériaux étudiés présentent de bonnes potentialités quant à leur utilisation dans l'industrie briquetière. Ces matériaux ont donc un avantage industriel certes pas de moindre envergure qui est celui de constituer des ressources minérales premières entrant dans la fabrication d'une gamme très variée des produits finis :

- briques pleines ;
- hourdis ;
- briques creuses ;
- tuiles et tant d'autres produits.

IV.2.5. Limites d'Atterberg

IV.2.5.1. Principe de détermination

En vue de déterminer les limites d'Atterberg des échantillons de sols argileux issus des environs de Kinshasa, les matériels suivants ont été utilisés (Tabl.47):

- tamis de 425µm d'ouverture de maille ;
- cloche d'humidification et une étuve;
- spatule et coupelle d'Atterberg ;
- balance ;
- couteaux ;
- ventilateur et dessiccateur;
- outil à rainure à V et pèse-filtre (tares).

Tableau 47: Poids des tares utilisées pour la détermination des limites d' Atterberg

Tares	Masses en grammes
36	49,194
44	49,676
48	50,824
49	49,337
53	48,564
66	48,656
69	47,488
62	50,823
6	45,351
24	46,427
37	49,035
52	50,707
61	48,701
22	48,472
27	49,279
56	49,675
65	50,733
4	44,201
51	50,342
68	48,155
30	49,990
33	50,976
50	48,777
64	50,372
72	50,540

La réalisation de cet essai a porté sur les matériaux préalablement passés au tamis de 425µm enfin d'éliminer les éventuels sables grossiers qui gêneraient la mesure.

La détermination de la limite de liquidité W_L a consisté à :

- étendre, sur la coupelle, une couche d'échantillon dans laquelle on trace une rainure ;
- imprimer à la coupelle des chocs semblables (en raison de 2 coups par seconde) en comptant le nombre de chocs nécessaires pour fermer la rainure sur 1 cm (les lèvres inférieures de l'entaille se touchent sur 1cm de long) ;
- prélever, dans la coupelle, une certaine quantité d'échantillons que l'on introduit dans une tare de poids connu ;
- peser : échantillon humide + tare, soit m_1 ;
- sécher les échantillons à l'étuve à plus au moins 105°C ;
- laisser, à la sortie de l'étuve, refroidir les échantillons au dessiccateur puis les peser pour obtenir le poids des échantillons secs + tare, soit m_2 .

En vue de tracer une courbe assez représentative de l'échantillon, ces opérations ont été faites 4 à 6 fois selon la nature du matériau analysé.

Dans ces conditions, on détermine la teneur en eau de la manière suivante :

$$W (\%) = 100(P_{\text{eau}} / P_{\text{Echsec}}), \text{ avec : } P_{\text{eau}} = m_1 - m_2 \text{ et } P_{\text{Echsec}} = m_2 - P_{\text{Tare}}$$

En pratique, il est prouvé qu'il existe une relation entre le nombre de coups N et la teneur en eau W . La représentation de cette relation est une droite en coordonnées semi-logarithmiques lorsque le nombre de coups est compris entre 15 et 35 (HOLTZ R.D., KOVACS W.D., 1991 ; CALLAUD M.J., 2004).

Pour les mêmes intervalles de N , la formule ci-après permet de déterminer la limite de liquidité à l'aide d'une ou de deux mesures seulement (Fig.71).

$$W_L = (N/25)^{0,121}$$

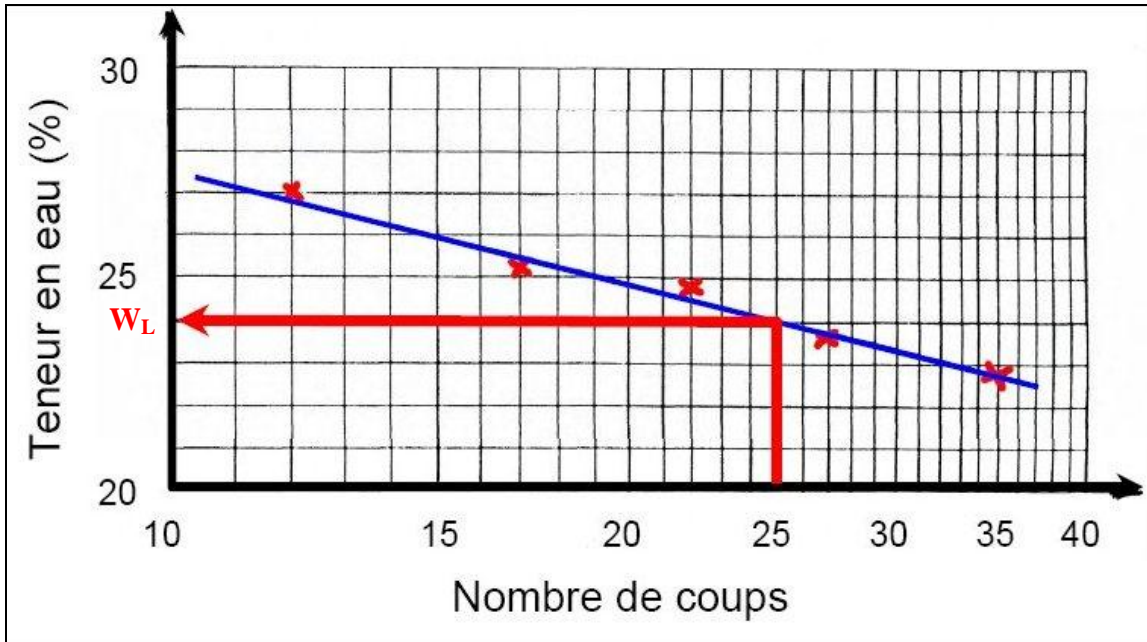


Fig. 71: Détermination pratique de la limite de liquidité (W_L) d'un matériau

Pour déterminer la limite de plasticité W_p , on roule l'échantillon en forme de fuseau qu'on amincit progressivement, c'est la formation des boudins. La limite de plasticité est la teneur en eau du fuseau qui se brise en petits tronçons de 10 à 20 mm de long au moment où son diamètre atteint 3mm.

On échantillonne ces boudins que l'on pèse avant et après séchage à l'étuve à plus au moins 105°C.

La moyenne arithmétique de la teneur en eau obtenue (sur 2 à 3 prises d'essais), comme pour la limite de liquidité W_L , représente la limite de plasticité W_p de l'échantillon ainsi analysé.

IV.2.5.2. Résultats et discussions

Le tableau n°48 présente les limites d'Atterberg accompagnées des indices y afférents des matériaux analysés.

Tableau 48: Les limites d'Atterberg des matériaux argileux des environs de Kinshasa

Echantillons	W_L (%)	W_p (%)	I_p	W (%)	I_c	W_s (%)	Type de matériau
KaN ₁ C-2	49	22	27	17	1,2	14	Plastique
KaN ₁ C-3	45	27	18	19	1,4	20	Plastique
KaSGIC-2	35	19	16	14	1,3	15	Plastique
KiS ₄ C-2	81	36	45	41	0,9	19	Très plastique
KiS ₃ C-4	84	35	49	47	0,7	18	Très plastique
KiS ₅ 2A	71	35	36	42	0,8	21	Plastique
KiS ₅ 2B	83	33	50	57	0,5	15	Très plastique

Les informations relatives à la classification des matériaux argileux des environs de Kinshasa sont reprises sur la figure n°72 et dans le tableau n°49.

C'est la classification unifiée de US Bureau Of Reclamation dénommée aussi « AC System » (Airfields Classifications System) laquelle se base sur l'analyse granulométrique et sur les limites d'Atterberg (IBNOUSSINA M. et al., 2004).

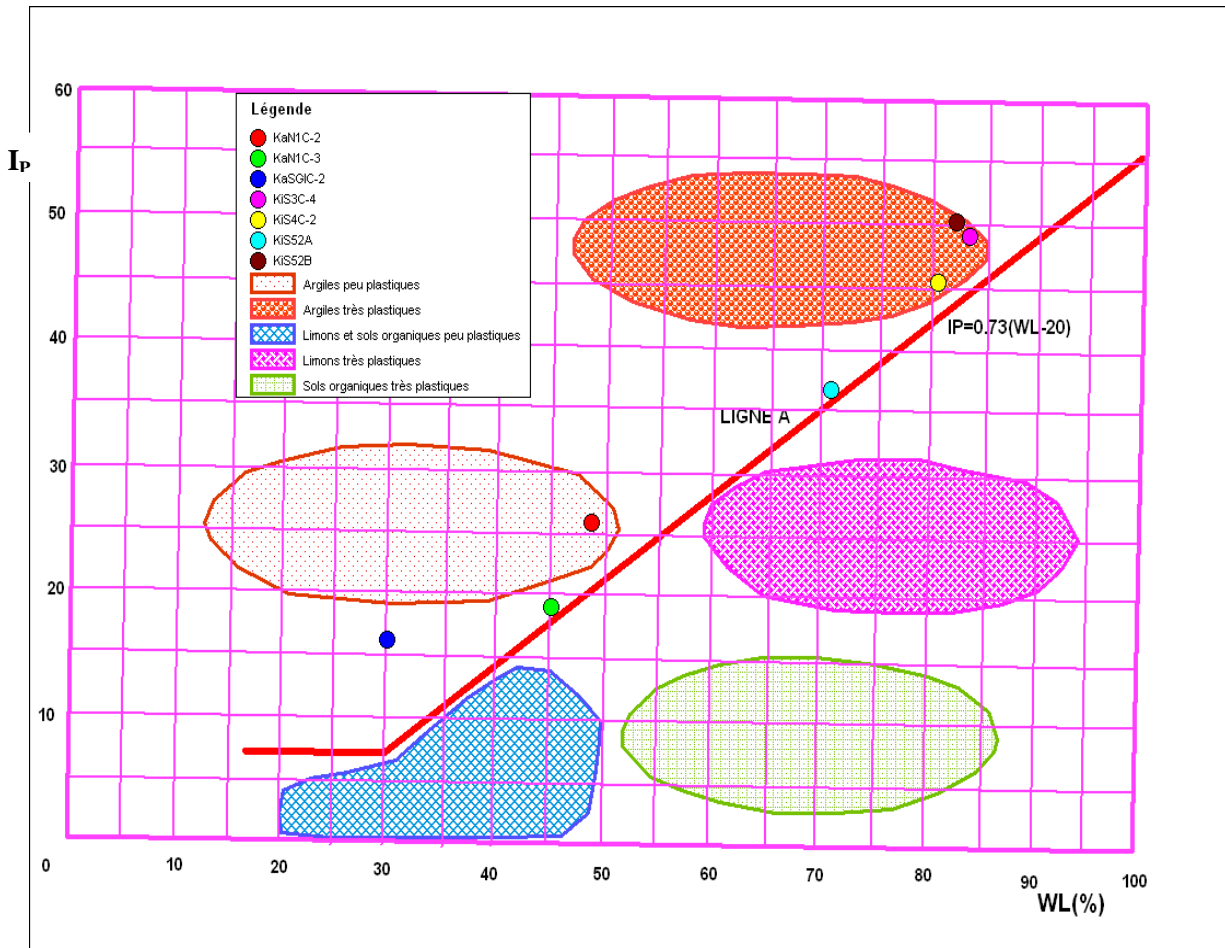


Fig. 72: Diagramme de plasticité des matériaux argileux étudiés

Tableau 49: Granulométrie et limites d'Atterberg des matériaux argileux étudiés

Sites	Echantillons	M.O (%)	Granulométrie		W _L (%)	W _P (%)	I _p
			%P _C (74μm)	< 2μm (%)			
Kasangulu	KaN ₁ C-2	0,5	61	32	49	22	27
	KaN ₁ C-3	0,6	57	4	45	27	18
	KaSGIC-2	0,5	34	22	35	19	16
Kingabwa	KiS ₄ C-2	1,4	96	40	81	36	45
	KiS ₃ C-4	0,4	96	50	84	35	49
	KiS ₅ 2A	0,1	97	42	71	35	36
	KiS ₅ 2B	0,5	99	59	83	33	50

Ce diagramme de plasticité comprend cinq domaines situés de part et d'autre de la droite d'équation : $I_p = 0,73(W_L - 20)$. Chacun de ces domaines dudit diagramme correspond à un groupe de sols aux propriétés mécaniques bien définies.

Alors que les sections situées au-dessus de la droite A sont des argiles inorganiques de plasticité faible, moyenne ou forte, celles localisées au-dessous de cette droite correspondent soit à des limons inorganiques de compressibilité variable, soit à des limons organiques ou à des argiles organiques.

Les échantillons analysés correspondent à des matériaux à grains fins avec 57% au moins de passants au tamis de $74\mu\text{m}$ d'ouverture de maille sauf pour les échantillons KaSGIC-2 (34%) et KaSGIRb (28%).

L'observation macroscopique confirmée par le test de l'équivalent de sable a relevé que l'échantillon KaSGIRb est trop sableux ($ES = 40\%$), ce qui n'a pas nécessité la détermination des limites d'Atterberg.

La position des échantillons analysés au-dessus de la droite A et les valeurs de la limite de liquidité permettent de les réunir en deux groupes :

- matériaux pour lesquels $W_L < 50\%$: KaN₁C-2, KaN₁C-3 et KaSGIC-2 ; ce sont des argiles (Groupe CL) inorganiques, maigres, limoneuses et/ou sableuses de plasticité relativement moyenne et de consistance semi-solide ; le matériau de l'échantillon KaN₁C-3 est susceptible de présenter de forts retraits au séchage ;
- matériaux dont la $W_L > 50\%$: KiS₄C-2, KiS₃C-4, KiS₅2A et KiS₅2B qui correspondent aux argiles (Groupe CH) inorganiques de consistance plastique, grasse, de haute compressibilité ou de très grande plasticité.

Ces argiles semblent être de kaolinites associées aux illites. L'alignement quasi-parallèle de certains échantillons analysés par rapport à la droite A prouve qu'ils proviennent d'une même origine (même couche géologique).

Des observations précédentes, il se dégage que les échantillons analysés sont des matériaux au comportement mécanique utile pouvant justifier leur usage dans le domaine de la construction et plus spécialement dans l'industrie de la briqueterie et/ou de la céramique fine.

IV.2.6. Proctor Normal Modifié

IV.2.6.1. But et signification de l'essai

Dans le domaine de la construction des bâtiments, le compactage des sols argileux est largement utilisé pour la fabrication des briques crues ou stabilisées par des liants hydrauliques.

La teneur en eau de malaxage (opération préalable au malaxage) optimale est un indice qui permet de caractériser le comportement d'une terre en présence de l'eau. Pour ce malaxage, la teneur en eau optimale (W_{opt}) représente la quantité d'eau nécessaire pour lubrifier les particules de terre et leur permettre de se déplacer à l'intérieur de la masse afin d'occuper le moins de place possible.

La portance d'un sol, caractéristique qui définit sa capacité à supporter les charges qui lui sont appliquées, est étroitement dépendante de la nature de ce sol, de son pourcentage d'eau et du degré de compactage. Quel que soit le sol, sa résistance mécanique augmente donc avec sa densité en faisant passer plusieurs fois des engins lourds qui assurent le compactage.

L'essai Proctor a pour but de déterminer :

- la teneur en eau optimale conduisant à une force portante maximale pour un sol donné et selon des conditions de compactage précises ;
- la masse volumique maximale correspondant à un état de compacité maximale et à une capacité de résistance maximale.

La combinaison de ces deux paramètres contribue à l'identification et à l'estimation de la qualité du malaxage d'un sol (Tabl. 50 et 51).

Tableau 50: Ordre de grandeur de paramètres Proctor d'un sol

Nature du sol	ρ_{dmax} (KN/m ³)	W_{opt} (%)
Argile	20	20
Limon	17	17
Sable de rivière	16	6
Sable limoneux	19	12
Grave naturelle	20	8
Grave reconstituée	20	6

Tableau 51: Estimation de la qualité du malaxage d'un sol

Seuils de ρ_d (Kg/m ³) à W_{opt}	Qualité du mélange
1650 – 1760	Médiocre
1760 – 2100	Satisfaisant
2100 – 2200	Excellent
2200 – 2400	Exceptionnel

IV.2.6.2. Principe de la méthode

Le principe de l'essai Proctor consiste à humidifier un sol à plusieurs teneurs en eau et à le compacter selon un procédé et une énergie conventionnels. Pour chacune des valeurs de teneurs en eau considérée, on détermine la densité sèche du sol et on établit la courbe des variations de cette densité en fonction de la teneur en eau.

$$\gamma_d = f(W) \text{ c'est-à-dire : } \frac{P_h}{(1 + W) \cdot V_m} = f\left(\frac{W_w}{W_s} \times 100\right)$$

γ_d : densité sèche en T/m³ ;

P_h : poids net humide en gramme ;

V_m : volume du moule en cc ;

W_w : poids de l'eau en gramme (poids total humide – poids total sec) ;

W_s : poids total sec – poids de la tare, en gramme ;

W : teneur en eau en pourcentage.

Cette courbe, appelée courbe Proctor, joignant au mieux les points obtenus passe par un maximum qui correspond à l'Optimum Proctor : l'abscisse du maximum de cette courbe représente la teneur en eau optimale (W_{opt}) et son ordonnée la densité sèche optimum γ_{opt} . Ce sont ces deux valeurs qui sont communément appelées caractéristiques de compactage Proctor.

Considérant la surcharge que pourront subir les briques au cours de leur vie, l'essai Proctor Modifié (PM) qui utilise une énergie importante (forte résistance souhaitée) a été exécuté dans ce travail.

IV.2.6.3. Matériels

Durant l'essai Proctor Modifié, le matériel suivant a été utilisé :

- moule et dame Proctor ;
- tamis ;
- éprouvettes graduées ;
- balance ;
- étuve 105°C ;
- petits récipients (tares pour mesure de teneurs en eau) ;
- bacs d'homogénéisation de matériaux ;
- règle à araser ;
- disque d'espacement ;
- truelle, spatules, pinceau,...

IV.2.6.4. Résultats

Deux échantillons de sols argileux de Kasangulu (KaN₁C-2 et KaN₁C-3) devant être utilisés dans la fabrication des briques ont été soumis à l'analyse géotechnique par Proctor Modifié. Les résultats obtenus sont consignés dans la figure n°73.

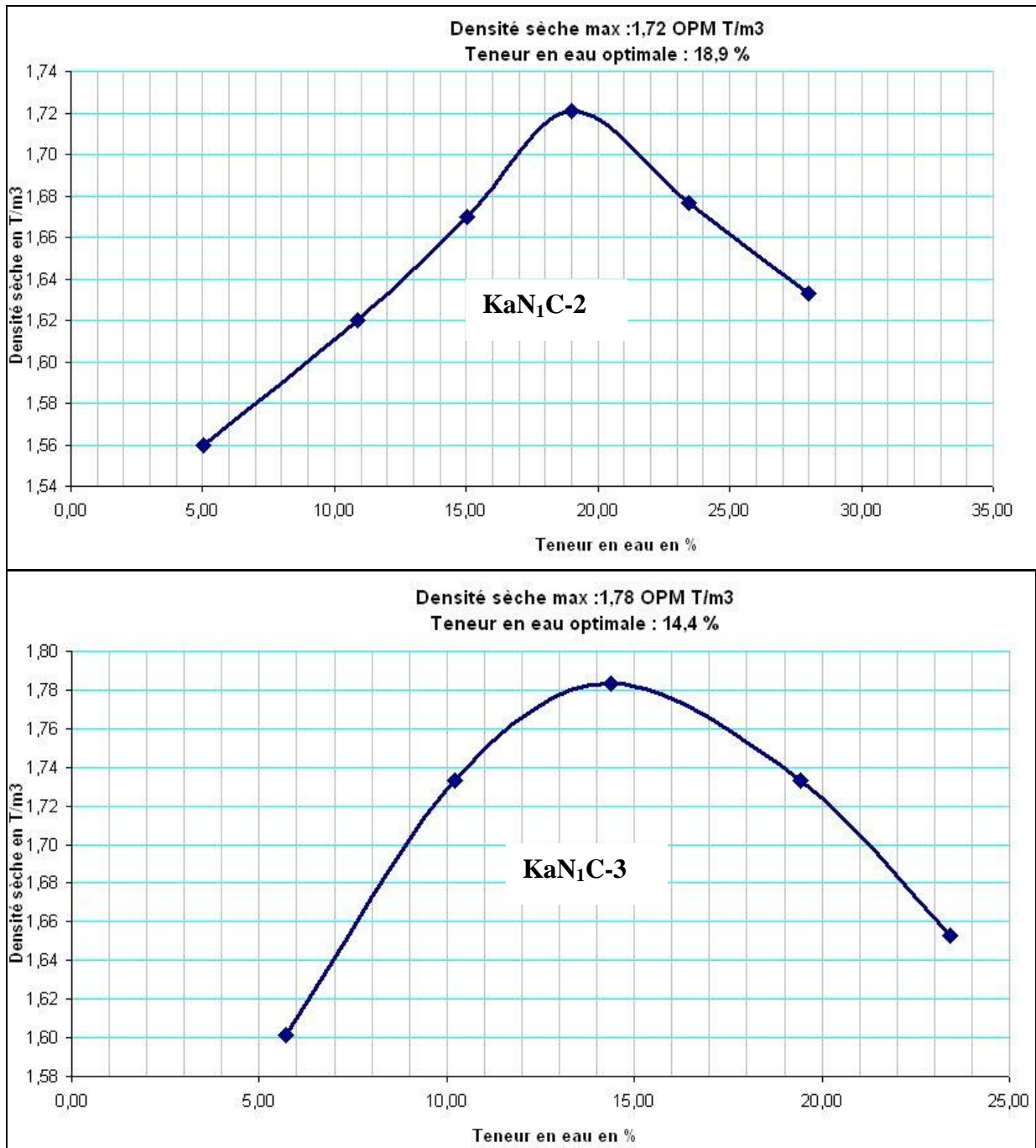


Fig. 73: Courbe Proctor de matériaux de Kasangulu

IV.3. Analyses chimiques

Les analyses chimiques des matériaux argileux des environs de Kinshasa ont porté sur les dosages des éléments :

- solubles et/ou toxiques (Pb, S) par spectroscopie d'absorption atomique ;
- majeurs (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O et P_2O_5) par la spectrofluorescence X (XRF).

IV.3.1. Spectroscopie d'absorption atomique

IV.3.1.1. Matériel et méthode

En vue de déterminer les éléments en trace métallique, les matériaux argileux étudiés ont été analysés au spectroscope d'absorption atomique de marque Perkin-Elmer (disponible au laboratoire GeMMe-ULg) par fusion oxydante (Na_2O_2) et solubilisation dans HCl dilué.

Conjointement à cette analyse, des mesures de pH ont été prises sur ces matériaux.

IV.3.1.2. Résultats et discussions

Les pourcentages en éléments chimiques dosés sont repris dans le tableau n°52. Le soufre se trouve en traces inférieure à la limite de détection par cette technique dans tous les échantillons analysés.

Tableau 52: Pourcentages en éléments en trace métallique et pH des matériaux naturels

Sites	Echantillons	Cu (%)	Co (%)	Pb (%)	Zn (%)	pH
Kasangulu	KaSGIRs	0,015	0,038	0,100	0,086	-
	KaSGIRa	0,016	0,051	0,106	0,085	-
	KaSGIRb	0,013	0,036	0,106	0,099	4,10-4,13
	KaSGIC-2	0,017	0,046	0,106	0,093	4,28-4,30
	KaN ₁ C-2	0,024	0,051	0,100	0,069	4,16-4,18
	KaN ₁ C-3	0,023	0,049	0,100	0,073	4,29-4,33
Kingabwa	KiS ₅ 2A	0,017	0,043	0,087	0,096	3,96-4,00
	KiS ₅ 2B	0,021	0,043	0,087	0,069	4,00-4,03
	KiS ₃ C-4	0,023	0,049	0,088	0,079	4,30-4,33
	KiS ₄ C-2	0,022	0,047	0,089	0,080	4,00-4,03

Les teneurs en cuivre, cobalt et zinc sont inférieures à 0,1% alors que celle de plomb tourne autour de 0,1%. Ces pourcentages sont tolérables pour :

- occasionner certains défauts dont l'efflorescence dans les produits finis ;

- provoquer des problèmes de corrosion et de pollution pendant l'évacuation dans les fumées lors de la cuisson ;
- la consommation, particulièrement pour les Mamans enceintes.

Les valeurs de pH variant de 4,00 à 4,33 sont conformes au pH de la grande majorité des argiles céramiques. Avec ces valeurs, ces matériaux sont franchement acides et doivent leur acidité soit à la présence des ions ferrugineux et alumineux, soit aux impuretés des matières humiques qu'ils contiendraient, soit encore à l'eau de lessivage ou de transport qui aurait communiqué à ces matériaux leur pH déterminé (JOURDAIN A., 1966 ; JOUENNE C.A., 1984 ; FIALIPS G.C., 1999).

IV.3.2. Fluorescence X

IV.3.2.1. Procédé analytique et préparation des échantillons

La technique analytique par spectrométrie de fluorescence X utilise des phénomènes physiques qui ont été découverts et développés dans le domaine de la physique quantique dont l'effet photoélectrique, l'émission spontanée et la diffraction des rayons X (BERNACHE A., 1993).

On excite l'échantillon à analyser avec un rayonnement standard (solicitation avec un tube à rayon X) et on analyse le rayonnement propre réémis par l'échantillon.

Ainsi pour pouvoir étudier un échantillon, il faut :

- générer des rayons X susceptibles d'exciter un atome et d'éjecter un électron ;
- récupérer et compter les photons émis en fonction de leurs niveaux d'énergie ;
- analyser le signal obtenu.

La fluorescence X de type ARL 9400 XP, disponible à l'Unité de Recherche en Pétrologie, Géochimie endogène et Pétrophysique au département de Géologie de la Faculté des Sciences de l'ULg, a été utilisée pour le dosage des éléments majeurs contenus dans les échantillons étudiés. Pour cette analyse, l'échantillon est préalablement dissout dans un verre boraté alourdi par du lanthane puis coulé sous forme d'une pastille. Tous les éléments majeurs, excepté le sodium sont dosés sur cette pastille. Une deuxième pastille faite de poudre simplement compactée sert au dosage du sodium.

En vue de déterminer la perte au feu (P.E ou LOI), l'échantillon est calciné à 950°C ; on y ajoute une quantité de spectroflux pour obtenir la pastille au borax.

Pour la pastille de poudre, on mélange 7g d'échantillon broyé avec quelques gouttes de lucite dissoute dans de l'acétone et, après évaporation, on compacte le tout dans un moule à une pression d'environ 12 T/cm².

Les éléments majeurs sont excités avec un tube au Rh ou au W (pour le manganèse) sous 50 KV et 50 mA et mesurés sur les raies les plus intenses correspondants aux $K\alpha$.

IV.3.2.2. Résultats et discussions

Les résultats d'analyse par fluorescence X de dix échantillons de matériaux argileux des environs de Kinshasa sont repris dans le tableau n°53.

Tableau 53: Résultats (en pourcentage) d'analyse par fluorescence X

Oxydes	Echantillons									
	Kasangulu					Kingabwa				
	KaSGi Ra	KaSGi Rb	KaSGi C-2	KaN ₁ C-3	KaN ₁ C-2	KaSGi Rs	KiS ₃ C-4	KiS ₄ C-2	KiS ₅ 2A	KiS ₅ 2B
SiO ₂	69,42	65,94	82,66	61,84	66,49	70,57	51,08	58,66	49,98	52,39
TiO ₂	0,32	0,64	0,59	0,69	0,83	0,48	0,92	0,91	0,87	0,90
Al ₂ O ₃	16,88	20,48	9,68	22,05	19,20	13,92	30,92	28,35	30,9	29,83
Fe ₂ O ₃	2,78	1,80	2,52	5,31	5,12	2,95	1,86	1,05	1,95	1,41
MnO	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
MgO	0,53	1,03	0,05	0,52	0,36	1,36	0,70	0,53	0,74	0,61
CaO	0,11	0,03	0,03	0,02	0,02	0,38	0,03	0,02	0,03	0,03
Na ₂ O	1,08	0,01	0,01	0,01	0,01	2,44	0,01	0,01	0,01	0,01
K ₂ O	4,19	5,11	0,14	1,60	0,95	4,70	1,11	0,81	1,08	0,95
P ₂ O ₅	0,03	0,04	0,02	0,01	0,02	0,08	0,07	0,06	0,07	0,05
P.F	5,15	5,37	4,59	8,56	7,75	2,88	13,33	10,00	13,71	13,85
Total	100,51	100,46	100,3	100,62	100,76	99,77	100,03	100,4	99,35	100,04

De l'examen des pourcentages en éléments majeurs contenus dans ce tableau, il se dégage des observations suivantes :

- les teneurs en silice varient entre 50 et 59% pour les échantillons de Kingabwa et de 62 à 71% pour ceux de Kasangulu, sauf pour l'échantillon KaSGIC-2 qui a donné une teneur de 82% en silice, laquelle laisse penser à un sol remanié. Les pourcentages en silice des matériaux de Kasangulu sont relativement élevés pour les ranger parmi les argiles plastiques qui se rapprochent assez bien des échantillons de Kingabwa (JOURDAIN A., 1966 ; NGON NGON G., 2007) ;
- les teneurs en alumine tournent autour de 30% pour les matériaux de Kingabwa et varient de 10 à 22% en ce qui concerne les matériaux de Kasangulu. Ces teneurs permettent de ranger, respectivement, ces matériaux parmi les produits argileux réfractaires et les produits silico-argileux;
- les matériaux de Kasangulu renferment des teneurs en TiO₂ modestes (de 0,32 à 0,83%) et celles en sesquioxyde de fer comprises entre 1,7 et 6% avec une bonne concentration (de l'ordre de 5%) dans les couches 2 et 3.

Ces analyses confirment les observations macroscopiques sur terrain, lesquelles ont mis en évidence l'existence d'une couche de saprolithe latéritisée. Ils peuvent donc servir de ressources premières pour la fabrication des briques de couleur rougeâtre, orange ou jaunâtre. Avec des teneurs en Fe_2O_3 et TiO_2 respectivement inférieures à 2% et à 1%, les matériaux naturels de Kingabwa peuvent conduire à des produits relativement blanchâtres;

- la roche gréseuse (KaSGIRs) et les roches les moins altérées (KaSGIRa et KaSGIRb) titrent environ 5% de K_2O et 1 à 2% de Na_2O , teneurs liées à la présence des micas et de feldspaths alcalins composant ces roches. Les produits les plus altérés de cette séquence gréseuse (KaN₁C-2, KaN₁C-3 et KaSGIC-2) de Kasangulu ont donné des teneurs en alcalins inférieures à 2%, ce qui justifie leur impact négatif négligeable lors des procédés (stabilisation ou cuisson) de production des briques. On note dans ces roches, une nette évolution géochimique concordante en alcalis ;
- les teneurs en alcalino-terreux (CaO et MgO) sont quantitativement et significativement trop faibles (< 1%, exceptés KaSGIRs et KaSGIRb). Les matériaux analysés sont donc dépourvus d'éléments carbonatés susceptibles d'occasionner des porosités dans les produits finis ;
- les pertes au feu des matériaux de Kasangulu sont nettement inférieures à celles de Kingabwa qui se rapprochent de 14%, valeur de la perte au feu de la kaolinite, ce qui laisse entrevoir que les échantillons de Kingabwa titreront plus de la kaolinite que les autres (CERATEC, 1997).

La composition chimique des échantillons analysés rentre globalement dans les limites admissibles d'utilisation technologique des matières premières dans la fabrication des produits céramiques (voir tableau n°12): les matériaux naturels de Kasangulu et plus spécialement les faciès des couches 2 et 3, constituent des ressources premières de bonne qualité pour la fabrication de briques stabilisées ou cuites de couleur rougeâtre, orange ou jaunâtre alors que ceux de Kingabwa sont utilisables dans la production des réfractaires silico-alumineux, des produits blanchâtres du secteur de la céramique fine.

Par ailleurs, les argiles kaolinitiques brutes de Kingabwa sont comparables aux deux kaolins commerciaux bien connus venant du gisement anglais de Cornwall (BLOODWORTH et al., 1993 ; HARBEN, 1999) (Tabl.54). Le premier (ECC), principalement utilisé pour la fabrication de la porcelaine, est considéré comme kaolin de haute qualité servant également de charge minérale des matériaux composites. Le second (SKD) est généralement utilisé pour la fabrication des céramiques sanitaires et comme matière première des réfractaires silico-alumineux.

Tableau 54: Comparaison des argiles de Kingabwa aux kaolins commerciaux

Éléments majeurs	Argiles					
	Commerciales de Cornwall (Angleterre)		Brutes de Kingabwa (RD Congo)			
	ECC	SKD	KiS ₃ C-4	KiS ₄ C-2	KiS ₅ 2A	KiS ₅ 2B
SiO ₂	47	50	51,08	58,66	49,98	52,39
TiO ₂	0,03	1,00	0,92	0,91	0,87	0,90
Al ₂ O ₃	38	32,9	30,92	28,35	30,90	29,83
Fe ₂ O ₃	0,39	1,20	1,86	1,05	1,95	1,41
MnO	0	0	0,01	0,01	0,01	0,01
MgO	0,10	0,30	0,70	0,53	0,74	0,61
CaO	0,03	0,20	0,03	0,02	0,03	0,03
Na ₂ O	0,15	0,20	0,01	0,01	0,01	0,01
K ₂ O	0,80	1,60	1,11	0,81	1,08	0,95
P ₂ O ₅	-	-	0,07	0,06	0,07	0,05
P.F	13	12,60	13,33	10,00	13,71	13,85
Total (%)	99,5	100	100,03	100,4	99,35	100,04

Les teneurs moyennes en éléments majeurs des argiles brutes de Kingabwa qui montrent une différence plus marquée avec les kaolins commerciaux de Cornwall sont résumées dans le tableau suivant (Tabl.55).

Tableau 55: Composition chimique moyenne en éléments majeurs des argiles de Kingabwa et des kaolins commerciaux

Type	Éléments majeurs			
	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ + TiO ₂	MgO	Na ₂ O + K ₂ O
Kingabwa	1,77	2,46	0,64	0,99
ECC	1,23	0,42	0,10	0,95
SKD	1,52	2,20	0,30	1,80

Les valeurs du rapport SiO₂/Al₂O₃ montrent que les teneurs en kaolinite des matériaux de Kingabwa sont relativement inférieures à celles des kaolins commerciaux.

Ils renferment en revanche plus d'oxydes colorants tels Fe₂O₃ + TiO₂ et plus de magnésie qui est souvent responsable de la porosité dans les produits finis.

Même si les matériaux de Kingabwa n'ont subi aucun traitement en vue de l'amélioration de leurs performances industrielles, ils se rapprochent beaucoup plus du second kaolin commercial (SKD) du Cornwall à l'exception des teneurs (industriellement tolérables) en MgO, Na₂O + K₂O.

De plus, projetés dans les diagrammes binaire et ternaire des autres kaolins commerciaux européens (LIGAS et al., 1997), les échantillons de kaolinites brutes de Kingabwa montrent des ressemblances de compositions chimiques et/ou

minéralogiques plus marquées avec les kaolins de Bavaria d'Allemagne (Fig.74 et 75). Cette comparaison prouve encore davantage que les matériaux de Kingabwa sont porteurs d'intéressantes propriétés physico-chimiques qui permettent de les ranger parmi les kaolins industriels.

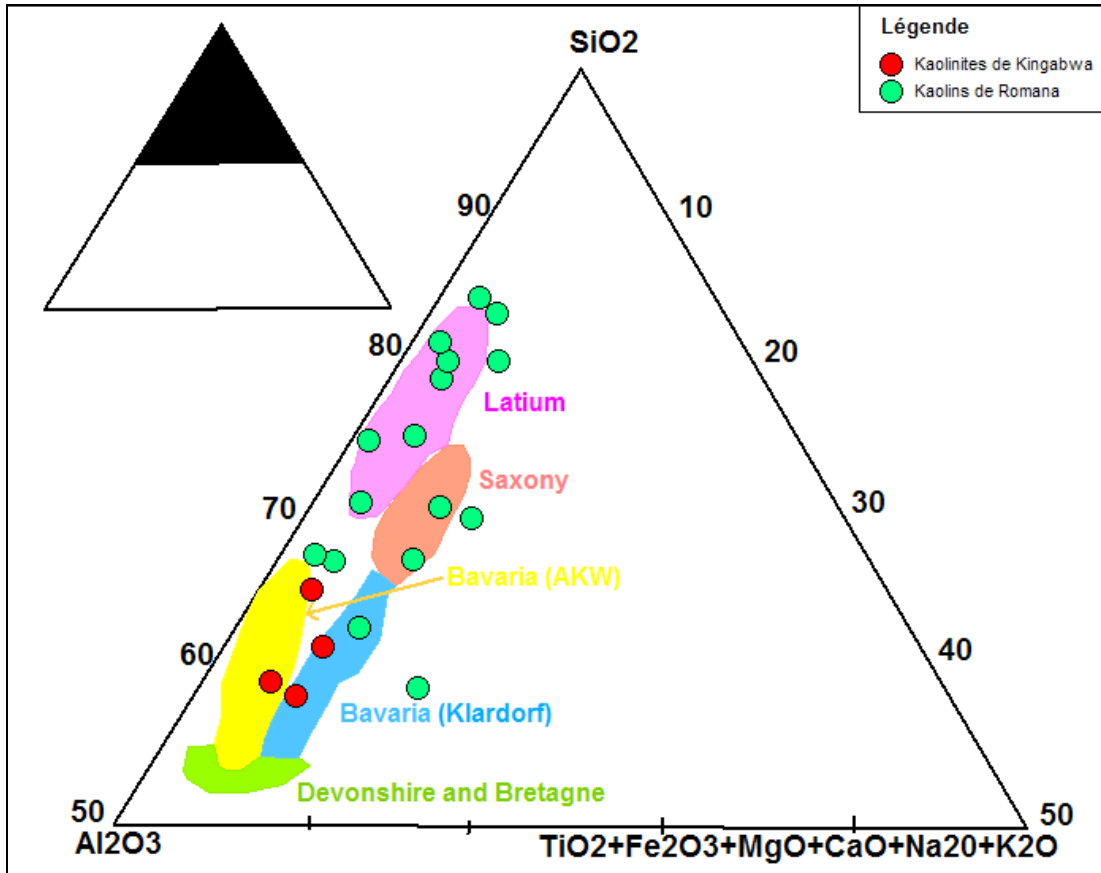
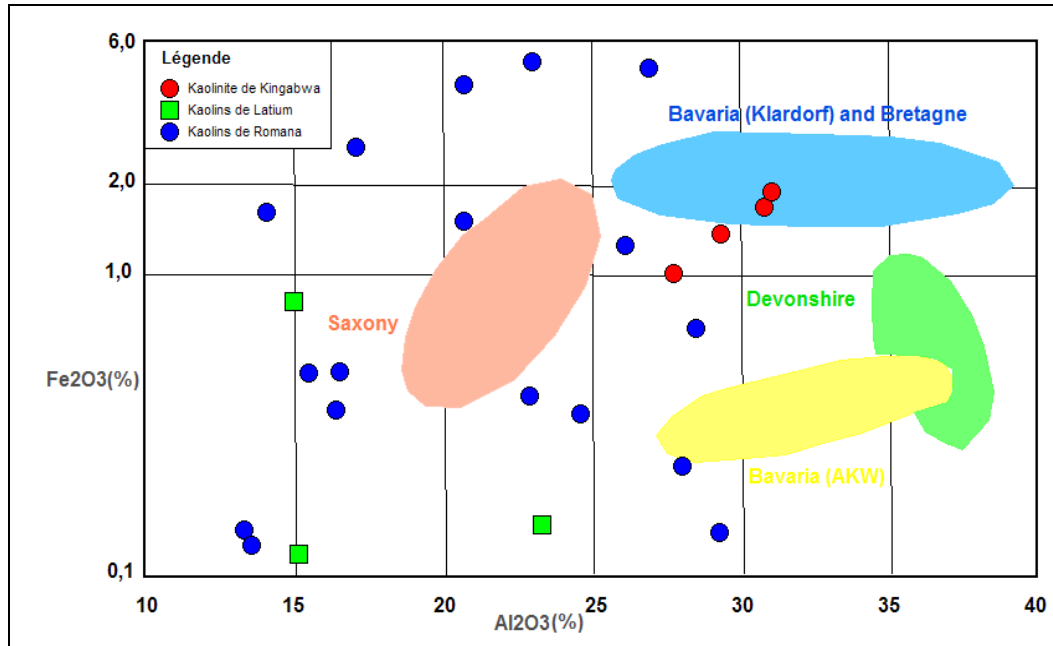


Fig. 74: Composition chimique des kaolinites de Kingabwa dans le diagramme ternaire de Ligas et al.

Fig. 75: Diagramme binaire Fe₂O₃-Al₂O₃ des matériaux de Kingabwa

Les matériaux de Kasangulu sont, quant à eux, comparables aux argiles brutes-types européennes utilisées pour la production des briques ou des tuiles (Tabl.56).

Tableau 56: Comparaison des matériaux argileux de Kasangulu aux argiles-types de l'Europe

Eléments majeurs	Matériaux argileux					
	Bruts de Kasangulu (RD Congo)		Bruts-types (Europe)			
	KaN ₁ C-2	KaN ₁ C-3	ATB	ATM	ASP	TF
SiO ₂	66,49	61,84	61,5	42,6	58,9	77,8
TiO ₂	0,83	0,69	0,89	0,73	1,30	0,76
Al ₂ O ₃	19,20	22,05	18,7	17,5	24	9,26
Fe ₂ O ₃	5,12	5,31	8,05	6,10	5,37	4,00
MnO	0,01	0,01	-	-	-	-
MgO	0,36	0,52	1,06	2,59	0,36	0,76
CaO	0,02	0,02	0,96	11,9	0,75	1,28
Na ₂ O	0,01	0,01	0,42	0,37	0,13	0,89
K ₂ O	0,95	1,60	2,06	2,49	0,91	2,01
P ₂ O ₅	0,02	0,01	-	-	-	-
P.F	7,75	8,56	6,83	15,5	8,40	3,05
Total (%)	100,76	100,62	100,47	99,78	100,12	99,81

- ATB : argile à tuiles de Bourgogne,
- ATM : argile à tuiles de la Région marseillaise,
- ASP : argile pour produits creux du Sud de la Région parisienne,
- TF : terre franche pour briques pleines.

IV.4. Analyses minéralogiques

IV.4.1. Diffraction des rayons X

IV.4.1.1. Principe de la méthode

Technique analytique de base bien connue dans la caractérisation des matériaux, la diffraction des rayons X permet la détermination (identification) et la semi-quantification des phases minérales micro et/ou poly-cristallines.

Le principe de cette méthode est basé sur la diffraction des rayons X par le réseau cristallin selon la loi de Bragg. L'état cristallin est une répartition tridimensionnelle dans l'espace d'un motif atomique. Cet arrangement forme des plans parallèles et équidistants appelés plans réticulaires (h, k, l) séparés l'un de l'autre par une distance d qui est fonction de la nature du minéral concerné (Fig.76).

La méthode générale consiste à bombarder l'échantillon avec des rayons X issus d'une anode métallique et lesquels sont premièrement collimatés par une fente de divergence afin de produire un faisceau sub-parallèle. Ce dernier est dirigé sur l'échantillon selon un angle θ et est diffracté lorsque les conditions de la loi de Bragg exprimées par la relation suivante sont remplies (HARDY et TURCKER, 1988).

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

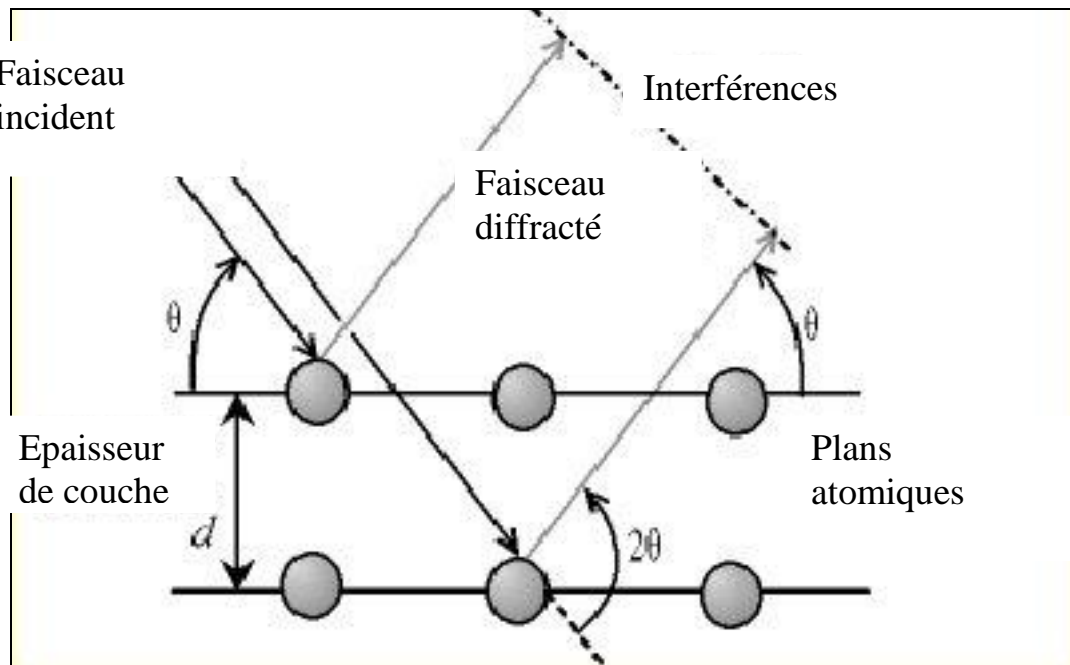


Fig. 76: Principe de diffraction des rayons-x par le réseau cristallin

Lorsqu'un faisceau de rayon X de longueur d'onde λ connue est projeté sur un matériel cristallin selon un angle θ , le phénomène de diffraction apparaît quand la distance inter-réticulaire d est égale à un multiple entier n de la longueur d'onde.

Cette loi impose aussi que l'angle entre le faisceau incident et le réseau cristallin soit égal à celui entre le réseau et le faisceau diffracté. Il faut donc, pour une rotation de Θ° de la platine porte-échantillon, amener le système d'analyse à un angle double de $2\Theta^\circ$. C'est le goniomètre qui assure ce rôle.

En faisant varier l'angle Θ , les conditions de la loi de Bragg sont satisfaites pour différentes valeurs de d dans les matériaux polycristallins. Après leur passage dans les différents réseaux de fentes, les rayons X diffractés sont reçus sur un détecteur. Le signal amplifié est reçu par le détecteur puis transmis à un ordinateur qui présente les résultats sous forme d'un graphe, le diffractogramme, représentant l'intensité des pics diffractés en fonction des positions angulaires c'est-à-dire de l'angle de déviation 2Θ (deux-thêta) du faisceau. Ce diffractogramme est caractéristique de l'échantillon analysé et l'intensité des pics (et/ou la surface selon les hauteurs) est fonction de la quantité de chaque phase minérale présente dans cet échantillon (HOLTZAPFFEL, 1985).

IV.4.1.2. Matériel

Les matériels ci-après ont été utilisés pour la préparation des échantillons, le traitement des préparations et l'analyse diffractométrique. Il s'agit de :

- mortier en agate et en porcelaine ;
- broyeur ;
- spatules ;
- vase de Berlin et erlenmeyer ;
- tamis de $250\mu\text{m}$ et de $63\mu\text{m}$;
- support en plastique ;
- lames de verre et lamelles couvre-objet ;
- entonnoir ;
- plaque d'agitation magnétique ;
- étuve à $35-40^\circ\text{C}$;
- pipettes ;
- balance ;
- cloche à éthylène-glycol munie d'une pompe à vide à membrane moulée ;
- four ;
- portoirs ou supports réfractaires ;
- Base de Données minéralogiques internationales (Fiches pdf, Powder Diffraction File) ;
- Diffractomètre Bruker D8 Advance (Fig.77) couplé à un logiciel de type EVA et présentant les caractéristiques suivantes: une source anticathode CuK_α ($\lambda = 1,5418\text{\AA}$), un générateur de haute tension (40 kV ; 30mA ; 1200W), un goniomètre avec un pas de $0,02^\circ 2\Theta$, une vitesse de mesure de 0,6sec/pas et

une vitesse de rotation de $2^\circ 2\theta/\text{min}$ et un détecteur de type compteur à scintillation.



Fig. 77: Diffractomètre Bruker D8 Advance-ULg, Géologie

IV.4.1.3. Préparation des échantillons

Les échantillons devant servir à l'analyse minéralogique totale ont été séchés à l'étuve à 40°C jusqu'à ce qu'ils soient totalement secs. Ils sont par la suite broyés manuellement au mortier en agate ou en porcelaine sauf pour l'échantillon KaSGIRs qui a nécessité l'usage d'un broyeur à bille et d'un pulvérisateur.

Les poudres obtenues sont passées au tamis de maille $250\mu\text{m}$. Les passants de ces tamis ont, selon la méthode de « backside » qui permet la réalisation d'un échantillon non orienté et moyennement tassé (BROWN G., BRINDLEY G.W., 1980), été introduits dans des supports plastiques inertes (PVC). Les échantillons de poudre sont ensuite légèrement compactés par l'arrière puis les supports sont refermés de manière à ne pas influencer l'orientation préférentielle des particules minérales contenues. Ils sont enfin soumis à un rayonnement X balayant un angle de 2° à $45^\circ 2\theta$ pendant 20 minutes pour la détermination de la composition minéralogique totale.

Des opérations particulières à la confection des préparations orientées ont été exécutées pour les échantillons destinés à l'analyse de la minéralogie des argiles.

Le délitage et l'homogénéisation de chaque échantillon brut sont pratiqués dans un erlenmeyer avec de l'eau distillée et à l'aide de la plaque d'agitation magnétique. La fraction grossière a été éliminée par tamisage à l'aide d'un tamis de maille $63\mu\text{m}$. La fraction inférieure à $63\mu\text{m}$ est ensuite introduite dans des piluliers pour y subir la sédimentation.

Les préparations argileuses sont réalisées sur la fraction inférieure à $2\mu\text{m}$. Cette fraction est obtenue par prélèvement à la pipette de 1,5cc à la profondeur de 1cm après un temps de sédimentation de 50 minutes selon la loi de Stokes. Les solutions de 1,5cc contenant les particules argileuses ont été déposées sur des lames de verre de 25x25mm à l'abri de toute vibration puis soumises à un séchage à l'air pendant une nuit. L'orientation de la préparation se fait alors naturellement, par sédimentation des phyllites, qui se déposent à plat sur la lame de verre.

Cette méthode permet un lent dépôt orienté des particules argileuses avec un axe c perpendiculaire à la lame et seules les réflexions (001) sont présentes sur les diffractogrammes (HOLTZAPFFEL T., 1985 ; THOREZ J., 1985 ; MOORE et REYNOLDS, 1989). Ces dépôts communément appelés « agrégats orientés » et obtenus par séchage à l'air libre (Normal : N) ont été soumis à un rayonnement X pour des valeurs de l'angle 2θ compris entre 2 et 30° .

IV.4.1.4. Traitements spéciaux de préparations

Si tous les minéraux argileux possédaient des écarts réticulaires différents, un seul passage de la lame aux rayons X assurerait une détermination précise et spécifique. Mais, plusieurs espèces minérales présentent des feuillets d'épaisseurs et d'écartement variables, voisins et/ou identiques. Dans ces conditions, l'analyse diffractométrique des préparations orientées dites « normales » est insuffisante pour distinguer entre elles certaines espèces argileuses. On soumet alors ces préparations à des traitements qui modifient l'espacement interfoliaire de manière spécifique. Deux de ces traitements ont été appliqués successivement à savoir la saturation par un polyalcool (Éthylène-Glycol : E.G) et le chauffage à 500°C sur les préparations orientées déjà analysées dans les conditions naturelles.

La saturation par un polyalcool a pour but de faire gonfler les feuillets des minéraux argileux par introduction, dans l'espace interfoliaire, de molécules d'éthylène-glycol de grosse taille. Pour cela, les préparations, les lames, ont été placées et maintenues durant 24 heures dans une cloche à éthylène-glycol (Fig.78). La pénétration (ou saturation) de l'éthylène-glycol dans les intervalles interfoliaires est réalisée par la création d'un vide primaire assuré par une pompe. Une fois sorties de la cloche utilisée pour la saturation, ces préparations ont été directement soumises à un rayonnement X en raison de dix minutes par échantillon pour des valeurs angulaires 2θ comprises entre 2 et 23° .



Fig. 78: Cloche de saturation des préparations naturelles à l'éthylène-glycol (E.G.)

Le chauffage permet de caractériser les minéraux argileux particulièrement sensibles à la chaleur tels que la kaolinite et d'autres minéraux hydratés. Pour ce faire, les échantillons ont été chauffés à 500°C durant 4 heures dans un four. Des portoirs réfractaires qui permettent aux lames de ne pas être jointives ont été utilisés dans ce four.

Après un temps de refroidissement de 15 minutes à la fin du chauffage, les échantillons ont été passés au rayonnement X (sept minutes par échantillon) balayant les valeurs angulaires de 2θ de 2 à 15°.

IV.4.1.5. Dépouillement des diffractogrammes

Quatre formes de diffractogrammes ont été produites sur deux types de matériaux naturels : les spectres sur poudres désorientées d'une part et d'autre part sur les agrégats orientés séchés à l'air libre (N), saturés à l'éthylène-glycol (E.G) et chauffés à 500°C (CH 500). Le traitement et l'analyse des diffractogrammes ont été, principalement, réalisés à l'aide du logiciel de type EVA 6.0 selon les étapes suivantes :

- soustraction du bruit de fond (Background curvature : 0 ou 0,1) dû à l'instrument ;
- lissage du spectre afin de faire disparaître les aspérités dues à la haute résolution instrumentale (Smooth factor : 0,1) ;

- repérage automatique des pics caractéristiques (Peak search) correspondant aux espèces minérales des préparations. Une Base de Données minéralogique internationale a été consultée et a permis de détecter de façon automatique les minéraux présents dans chaque préparation. Au cas où un ou plusieurs pics ne sont pas attribués à un des minéraux de la Base de Données internationale, une recherche plus approfondie est menée sur les valeurs de ces pics dans d'autres documentations notamment la liste des 34 minéraux les plus fréquemment rencontrés et déterminables dans les spectres des poudres (COOK et al., 1975 ; Tabl.57).

Tableau 57: Principaux minéraux déterminables dans les spectres des poudres

Minéraux	2 θ ° (CuK α)	d (Å)	Facteur de correction
Amphibole	10,30-10,70	8,59-8,27	2,50
Analcite	15,60-16,20	5,68-5,47	1,79
Anatase	25,17-25,47	3,54-3,50	0,73
Anhydrite	25,30-25,70	3,52-3,46	0,90
Apatite	31,80-32,15	2,81-2,78	3,10
Aragonite	45,65-46,00	1,96-1,97	9,30
Augite	29,70-30,00	3,00-2,98	5,00
Barite	28,65-29,00	3,11-3,08	3,10
Calcite	29,25-29,60	3,04-3,01	1,65
Chlorite	18,50-19,10	4,79-4,64	4,95
Clinoptilolite	9,70-9,99	9,11-8,84	1,56
Cristobalite	21,50-22,05	4,13-4,05	9,00
Dolomite	30,80-31,15	2,90-2,87	1,53
Erionite	7,50-7,90	11,70-11,20	3,10
Goethite	36,45-37,05	2,46-2,43	7,00
Gypse	11,30-11,80	7,83-7,50	0,40
Halite	45,30-45,65	2,00-1,99	2,00
Hématite	33,00-33,40	2,71-2,68	3,33
Kaolinite	12,20-12,60	7,25-7,02	2,25
Feldspath-K	27,35-27,79	3,26-3,21	4,30
Magnétite	35,30-35,70	2,54-2,51	2,10
Micas	8,70-9,10	10,20-9,72	6,00
Montmorillonite	4,70-5,20	18,80-17,00	3,00
Palygorskite	8,20-8,50	10,70-10,40	9,20
Phillipsite	17,50-18,00	5,06-4,93	17,00
Plagioclase	27,80-28,15	3,21-3,16	2,80
Pyrite	56,20-56,45	1,63-1,62	2,30
Rhodochroite	31,26-31,50	2,86-2,84	3,45
Quartz	26,45-26,95	3,37-3,31	1,00
Sépiolite	7,00-7,40	2,60-11,90	2,00
Sidérite	31,90-32,40	2,80-2,76	1,15
Talc	9,20-9,55	9,61-9,25	2,56
Tridymite	20,50-20,75	4,33-4,28	3,00
Gibbsite	18,00-18,50	4,93-4,79	0,95

La connaissance et les observations géologiques de terrains d'où proviennent les échantillons ont été aussi d'un apport important pour l'identification des espèces minérales en présence ;

- superposition des trois spectres classiques des préparations orientées (N-EG-CH500) permet, par l'observation à la fois de la forme, du nombre et de la position des réflexions, d'avoir une vision globale de l'échantillon en vue d'en déterminer aisément les minéraux argileux selon les positions des pics (001)

et leurs harmoniques correspondants. Les positions de ces raies (001) des principaux minéraux argileux sont reprises dans le tableau n°58 (THOREZ J., 1976).

Tableau 58: Position des raies (001 en Å) des principaux minéraux argileux

Spectres			Minéraux
N	EG	CH500	
7	7	-	Kaolinite (K)
10	10	10	Illite (I)
14	14	14	Chlorite (C)
14	16	14	Chlorite (Cg)
14	14	10	Vermiculite (V)
12-14	17	10	Smectites (Sm) Montmorillonites
10,4	10,4	10	Palygorskite (Pal)
12	12	10	Sépiolite (Sep)

La détermination des interstratifiés réguliers a consisté à identifier les pics dont la position, sur au moins un des trois essais, est intermédiaire entre celle des minéraux argileux simples. La position de la réflexion principale et ses variations après traitements permettent donc d'identifier la nature des feuillets qui composent le minéral (HOLTZAFFEL T., 1985).

L'estimation semi-quantitative de l'abondance relative des minéraux identifiés dans chaque échantillon se fait par la règle de trois simple en multipliant les intensités mesurées (sur le spectre de EG pour les préparations orientées) par un facteur correctif. Ce dernier tient à la fois compte de (COOK et al., 1975 ; THOREZ J., 1976 ; FAGEL N., 2004) :

- l'élargissement expérimental des réflexions qui affecte surtout les réflexions étroites (surface limitée);
- variations d'incidences du faisceau sur la préparation, surtout pour les petits angles où la surface analysée est grande.

Cette méthode semi-quantitative relative présente une précision estimée à $\pm 10\%$ (HOLTZAFFEL T., 1985).

IV.4.1.6. Présentation et interprétation des résultats

Les figures n° 79 et 80 illustrent les diffractogrammes des échantillons analysés. L'estimation semi-quantitative des phases minéralogiques totales et des minéraux argileux de ces échantillons est présentée respectivement dans les tableaux n°59 et 60.

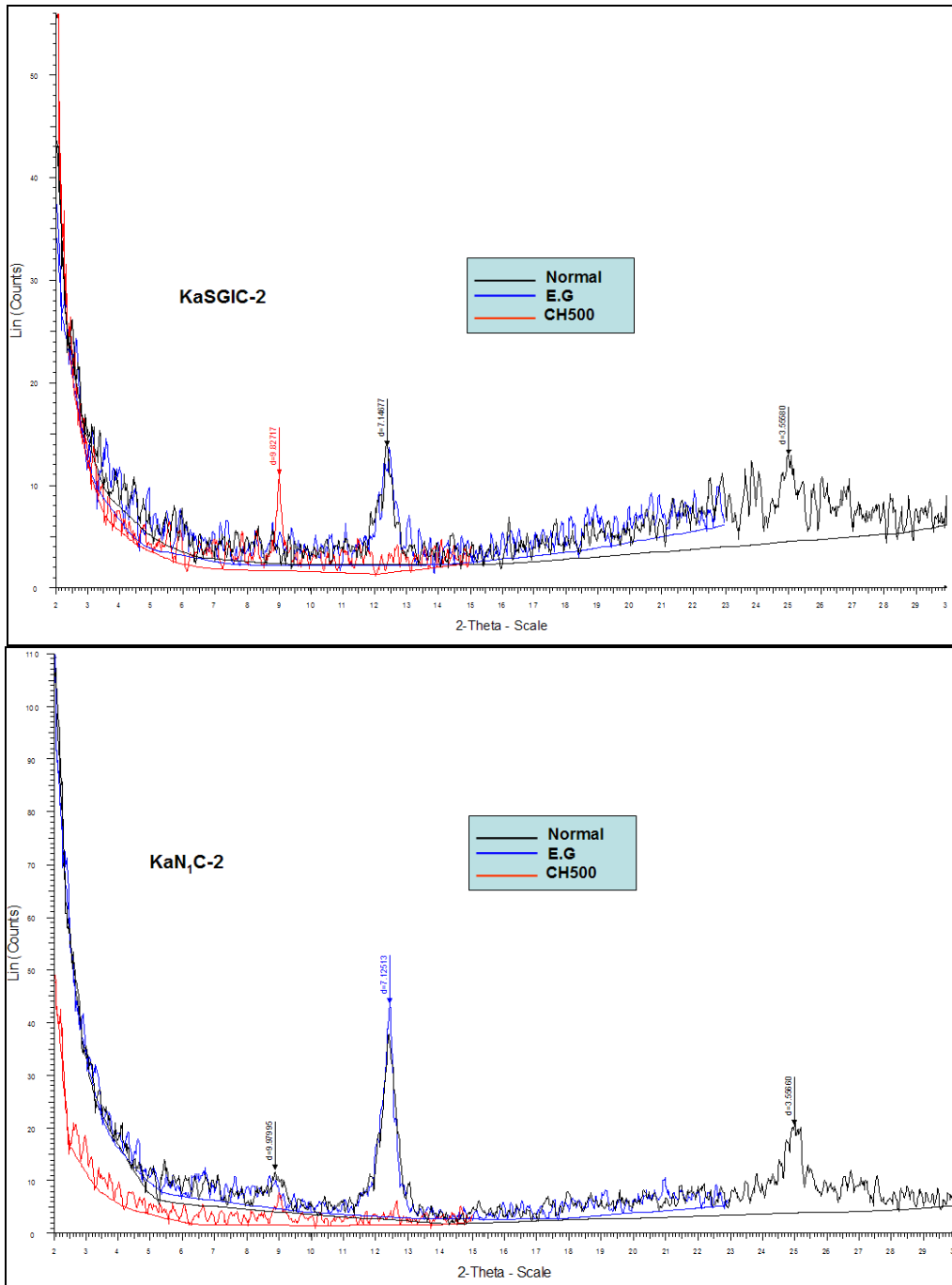


Fig. 79: Spectres RX classiques de préparations orientées de matériaux de Kasangulu

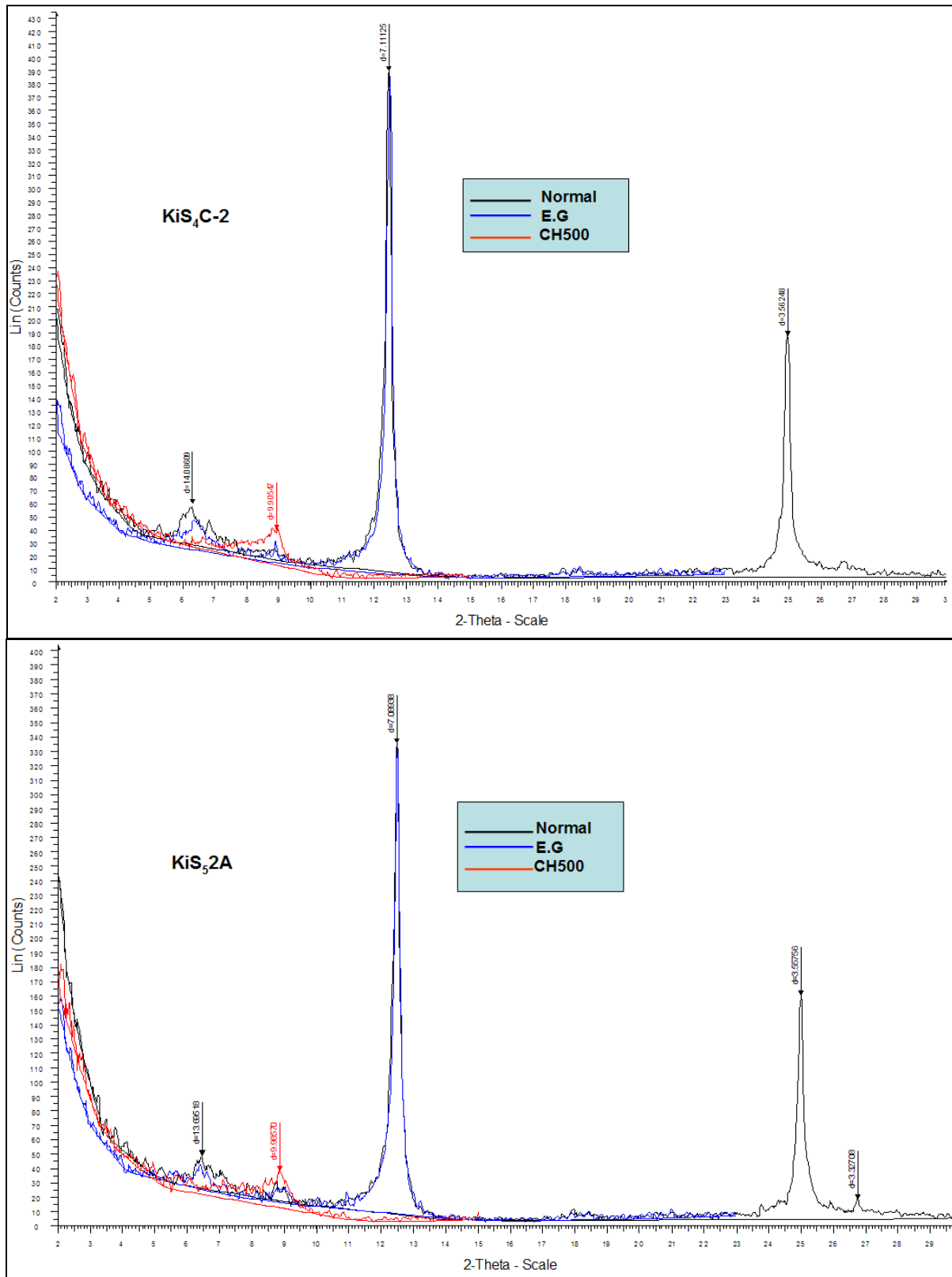


Fig. 80: Spectres RX classiques de préparations orientées de matériaux de Kingabwa

Tableau 59: Estimation semi-quantitative de la minéralogie totale

Echantillons	Minéraux	Facteur correctif	d (Å)	2 θ	Intensité	Intensité corrigée	Pourcentage
KaSGIRs	Quartz	1,00	3,34	26,6	164	164	39
	Feldspaths	2,80	3,19	27,9	45,9	128,5	31
	Muscovite	0,95	10	8,8	24	22,8	5
	Argile totale	20	4,45	19,9	5,2	104	25
						419,3	
KaSGIRa	Quartz	1,00	3,33	26,6	102	102	21
	Feldspaths	2,80	3,23	27,5	71,5	200,2	41
	Argile totale	20	4,45	19,9	9,3	186	38
						488,2	
KaSGIRb	Quartz	1,00	3,34	26,6	133	133	27
	Feldspaths	2,80	3,24	27,5	25,3	70,8	15
	Argile totale	20	4,45	19,9	14,3	286	58
						489,8	
KaSGIC-2	Quartz	1,00	3,34	26,6	259	259	55
	Argile totale	20	4,46	19,8	10,4	208	45
						467	
KaN ₁ C-3	Quartz	1,00	3,34	26,6	100	100	26
	Goethite	7,00	4,18	21,2	7,1	49,7	12
	Argile totale	20	4,45	19,9	12	240	62
						389,7	
KaN ₁ C-2	Quartz	1,00	3,34	26,6	462	462	68
	Argile totale	20	4,44	19,9	11,1	222	32
						684	
KiS ₃ C-4	Quartz	1,00	3,34	26,6	62,7	62,7	16
	Argile totale	20	4,46	19,8	16,8	336	84
						398,7	
KiS ₄ C-2	Quartz	1,00	3,34	26,6	100	100	21
	Argile totale	20	4,45	19,9	19,2	384	79
						484	
KiS ₅ 2A	Quartz	1,00	3,34	26,6	92	92	20
	Argile totale	20	4,45	19,9	17,8	356	80
						448	
KiS ₅ 2B	Quartz	1,00	3,34	26,6	57,5	57,5	13
	Argile totale	20	4,46	19,8	20,1	402	87
						459,5	

Tableau 60: Estimation semi-quantitative des minéraux argileux

Echantillons	Minéraux	Nombre de coups	Facteur correctif	Intensité corrigée	Pourcentage
KaSGIRa	Illite	14,7	1	14,7	63
	Kaolinite	9,64	0,7	6,75	29
	Chlorite	5,74	0,34	1,95	8
				23,4	
KaSGIRb	Illite	13,2	1	13,2	65
	Kaolinite	7	0,7	4,9	24
	(10 - 14C)	5,7	0,4	2,28	11
				20,4	
KaSGIC-2	Illite	6	1	6	38
	Kaolinite	13,8	0,7	9,66	62
				15,7	
KaN ₁ C-3	Illite	5,84	1	5,84	40
	Kaolinite	12,5	0,7	8,75	60
				14,6	
KaN ₁ C-2	Illite	10,2	1	10,2	25
	Kaolinite	43,7	0,7	30,59	75
				40,8	
KiS ₃ C-4	Illite	46,4	1	46,4	11
	Kaolinite	527	0,7	368,9	84
	(10 - 14V)	58,8	0,4	23,52	5
				438,8	
KiS ₄ C-2	Illite	31,9	1	31,9	10
	Kaolinite	386	0,7	270,2	84
	(10 - 14V)	47,9	0,4	19,16	6
				321,3	
KiS ₅ 2A	Illite	28	1	28	10
	Kaolinite	323	0,7	226,1	84
	(10 - 14V)	41	0,4	16,4	6
				270,5	
KiS ₅ 2B	Illite	52	1	52	12
	Kaolinite	504	0,7	352,8	81
	(10 - 14V)	73,5	0,4	29,4	7

Ces résultats montrent que la caractéristique commune à tous les matériaux analysés de deux sites pilotes est de présenter, dans des proportions variables, une minéralogie totale composée essentiellement de quartz, feldspaths (uniquement pour les échantillons de Kasangulu) et de la goethite alors que les minéraux argileux sont représentés par la kaolinite qui est fortement dominante (sauf dans les roches peu altérées de Kasangulu : KaSGIRa et KaSGIRb), l'illite et la chlorite sont en nette minorité. Des traces de gibbsite et de muscovite sont aussi observables sur les

spectres de la poudre désorientée. La kaolinite est, dans ce cas, le phyllosilicate porteur des propriétés céramiques favorables des matériaux étudiés.

Avec des pics bien résolus et des valeurs de L autour de 72, la kaolinite des échantillons de Kingabwa est mieux cristallisée que celle à pics assez larges des matériaux de Kasangulu qui contiennent un réseau minéral désorganisé (L autour de 30 feuillets par domaine cohérent).

L'existence de feldspaths dans certains échantillons de matériaux de Kasangulu présente un intérêt technique. En effet, la pâte plastique, formée par le mélange de l'argile avec de l'eau, se contracte pendant le séchage et surtout le chauffage. Ces retraits sont minimisés par des constituants non plastiques (dégraissants) dont les feldspaths qui jouent aussi le rôle de fondant en favorisant l'apparition d'une phase visqueuse à bas point de fusion au cours du traitement thermique et contribuant ainsi à réduire la porosité de la pièce et à en améliorer les propriétés mécaniques (ARIB A. et al., 2007).

La goethite est le minéral responsable de la teinte jaunâtre ou rougeâtre des produits finis qui en résulteront. Sa présence dans la couche KaN₁C-3 à Kasangulu peut refléter une origine détritique d'une source proximale (LAJOIE et CHAGNON, 1973).

En raison de leur faible développement, les sols argileux de Kasangulu sont issus des roches sédimentaires gréseuses de la région. Les minéraux argileux qu'ils contiennent sont de des néoformations à partir des solutions issues de l'altération (lessivage) des minéraux constitutifs de ces roches. Mis en évidence lors des observations de terrain dans les puits Nsaya-1 et Nsaya-2, l'horizon de ferrailles latéritiques qui sépare les couches 2 et 3 est un indice d'une altération ou d'un lessivage très poussée. Dans cet environnement, une partie du fer est mobilisée à l'état ferreux par les eaux réductrices soit en solution vraie, soit à l'état de complexes ferro-humiques. Ce fer est évacué plus loin pour gagner directement ou indirectement les bassins avals. L'autre fraction est libérée sur place et donne les sesquioxydes dont la goethite.

D'autre part, l'alumine qui ne voyage guère est entrée dans des combinaisons silicatées pour former les illites dans les zones d'altération ou de précipitation peu évoluées (KaSGIRa, KaSGIRb) ; les kaolinites et gibbsites dans les zones plus intenses (couches 2 et 3). Ces minéraux (kaolinites et gibbsites) peuvent être aussi formés par hydrolyse des feldspaths ou plagioclases et des micas constitutifs des grès

d'Inkisi suite à l'implication des eaux météoriques sous un climat tropical, chaud et humide (Fig.81 à 83).

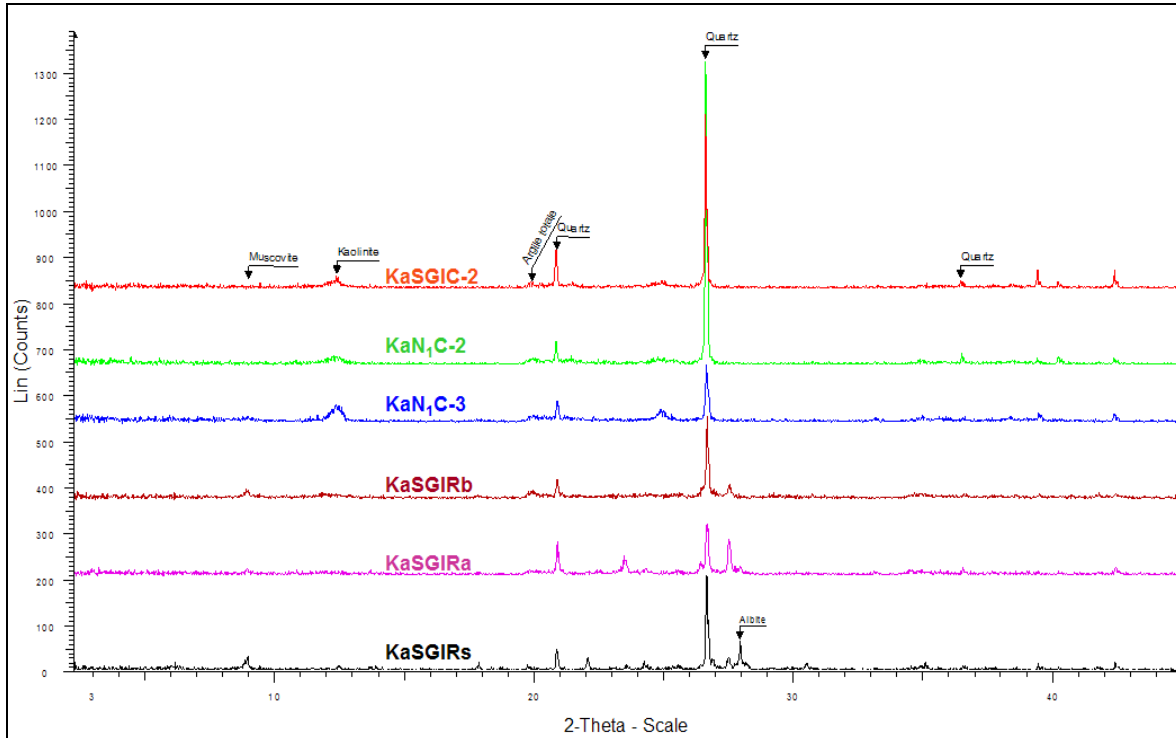


Fig. 81: Diffractogrammes des poudres désorientées de matériaux de Kasangulu

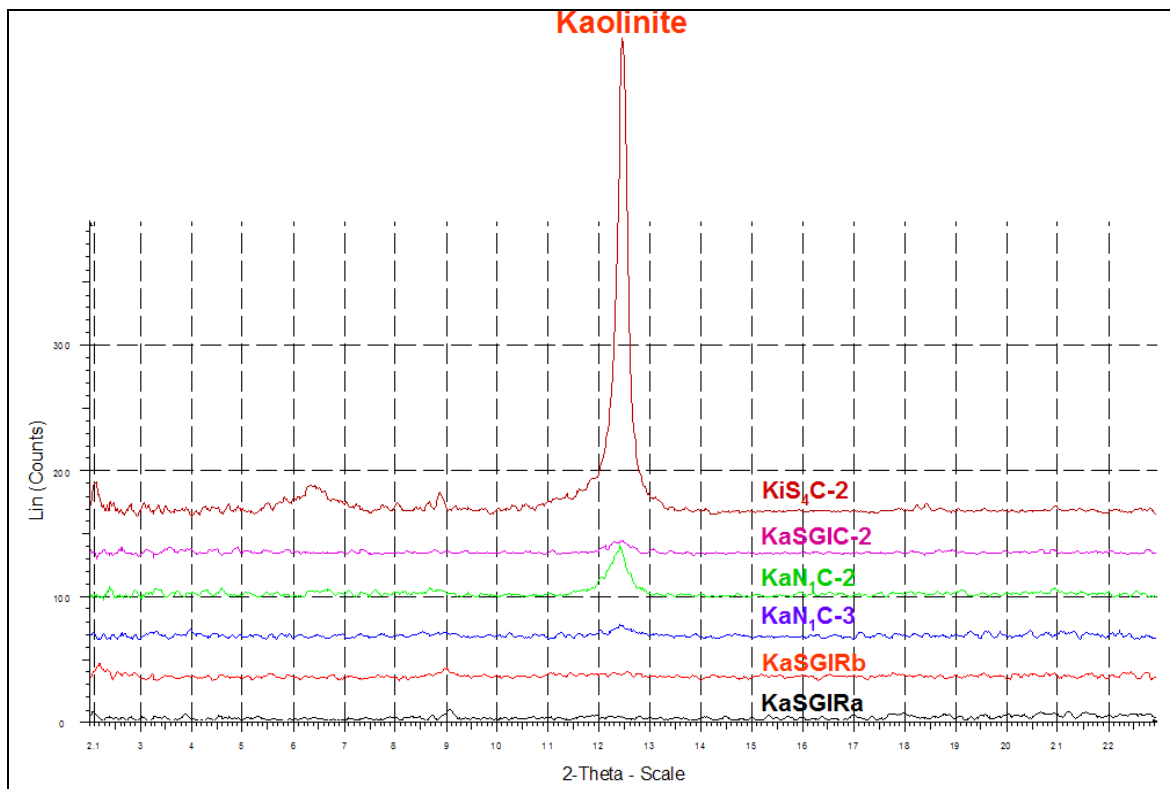


Fig. 82: Pseudo-3D des spectres RX (EG) des matériaux de Kasangulu

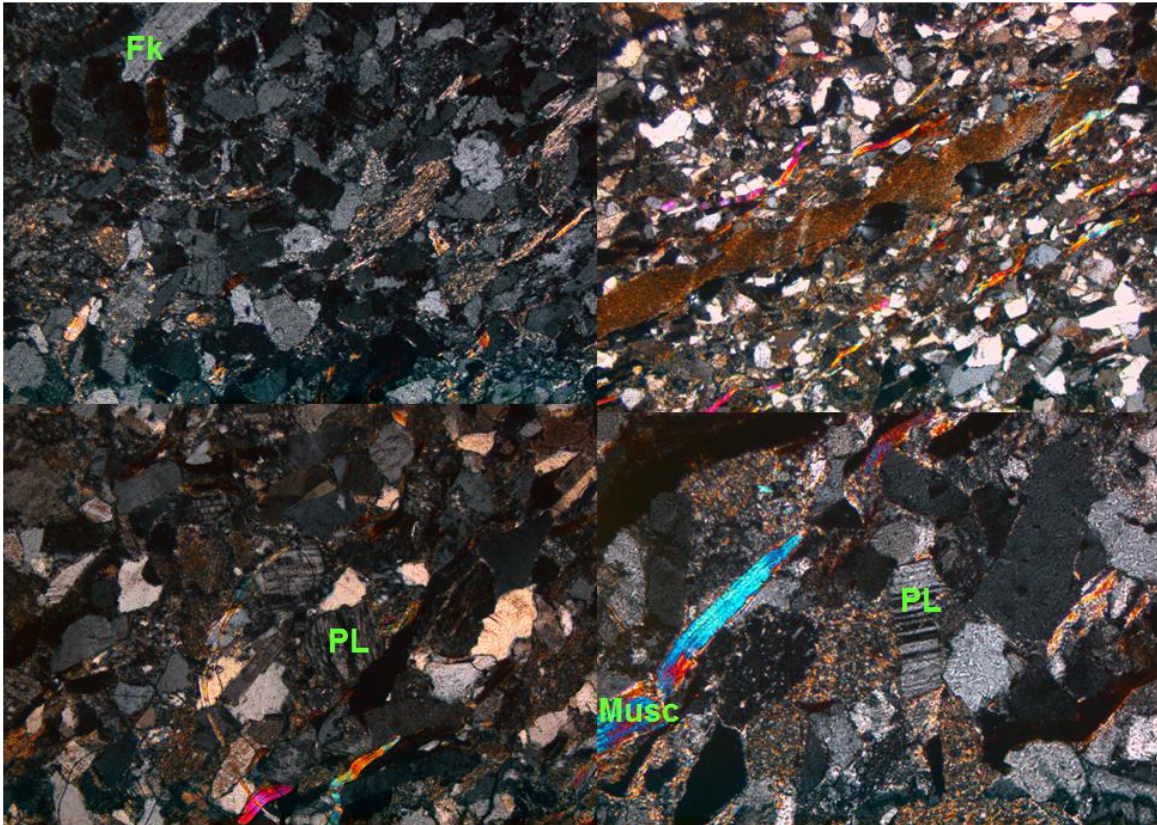


Fig. 83: Photos (5x, longueur de chaque photo : 2400 μ m) de lames minces du grès d'Inkisi (Echantillon KaSGIRs avec Fk : Feldspath ; PL : Plagioclase et Musc : Muscovite)

L'analyse des spectres RX des matériaux de Kasangulu montre que le bruit de fond présente un bombement pour la plupart d'entre eux et relève aussi des pics de kaolinite assez larges. Ceci laisse penser à l'existence des phases minéralogiques amorphes (allophanes) et/ou de la kaolinite mal cristallisée, en formation (FAGEL N. et al., 2003). Les observations géologiques du puits Nsaya-1 ont permis d'identifier une masse rocheuse friable de nature gréseuse en altération macroscopique au sein de la saprolithe latéritisée (Fig.84).



Fig. 84: Vue d'une masse rocheuse en altération au sein de la saprolithe à Nsaya-1

La composition minéralogique globale des matériaux de Kasangulu est semblable, au point de vue qualitatif, à celle de matériaux de Kingabwa qui n'ont pas révélé l'occurrence de feldspaths. Les diffractogrammes de matériaux de Kingabwa présentent des pics de kaolinite bien cristallisée et d'une grande pureté.

Les diffractogrammes des poudres désorientées et ceux des préparations orientées naturelles, saturées à l'éthylène-glycol et chauffées à 500°C sont superposables pour tous les échantillons extraits de différents niveaux des trois puits de Kingabwa (Fig.85 à 87). Ils présentent une parfaite similitude qui suppose une homogénéité des matériaux formés dans les mêmes conditions physico-chimiques, dans les mêmes environnements géologiques et lesquels seraient issus d'une source commune.

L'occurrence de ces matériaux argileux (associés à l'ambre et morceaux de bois fossilisés) en plein cœur de la plaine alluviale de la rivière Ndjili et en alternance avec les limons et les sables (retrouvés aussi en lentilles) suggère une sédimentation fluviale. En effet, cette plaine fait partie intégrante de la grande plaine de Kinshasa qui est traversée par un réseau hydrographique montrant deux directions préférentielles dont l'une, du sud vers le nord, prolonge les axes des vallées en provenance des collines et l'autre, transversale, suit les zones en dépression de la plaine.

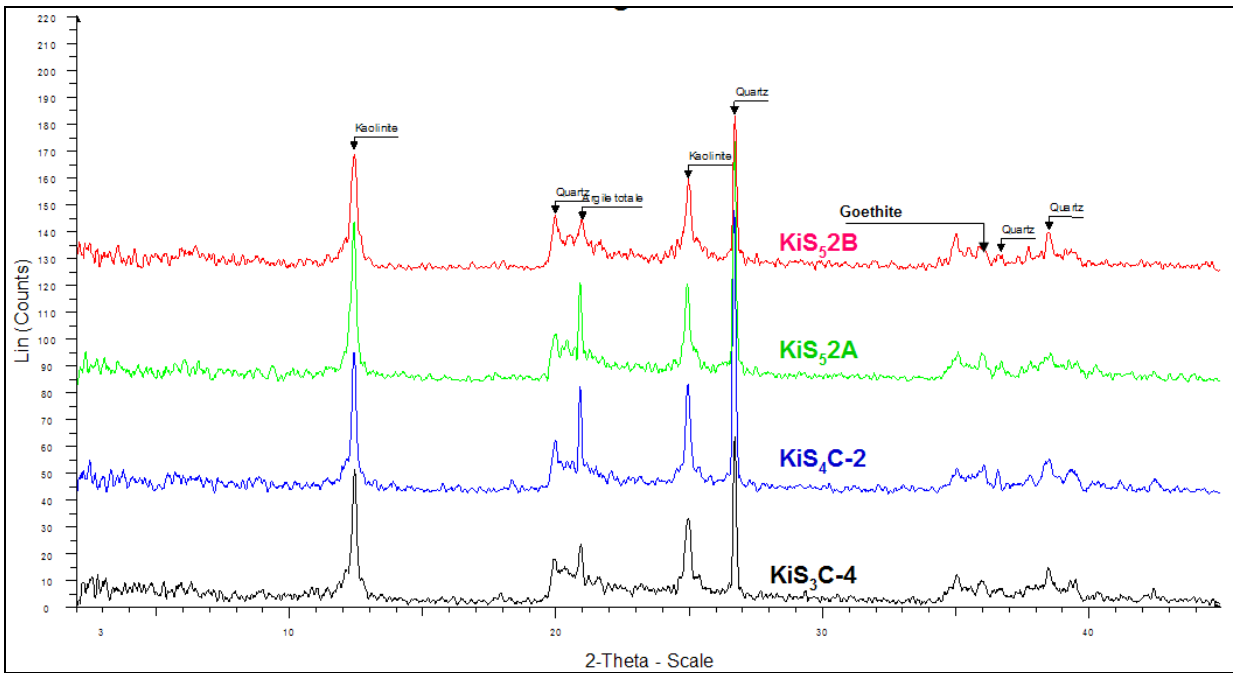


Fig. 85: Diffractogrammes des poudres désorientées des matériaux de Kingabwa

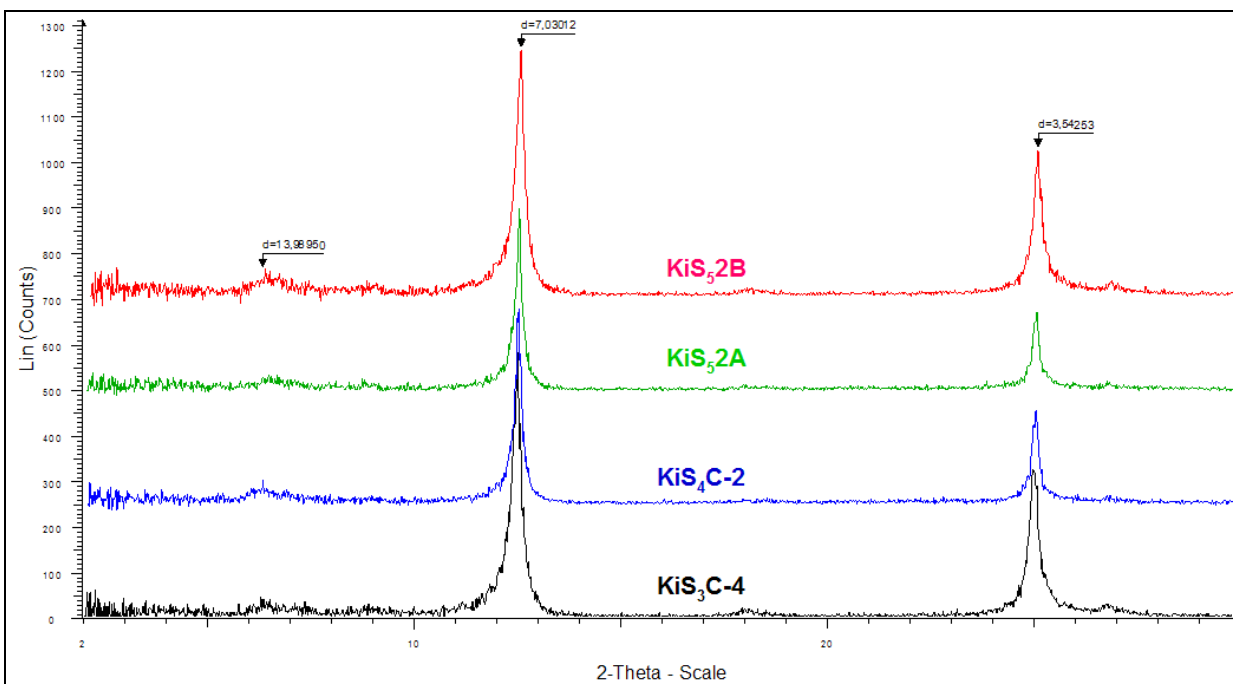


Fig. 86: Spectres RX des préparations orientées naturelles des matériaux de Kingabwa

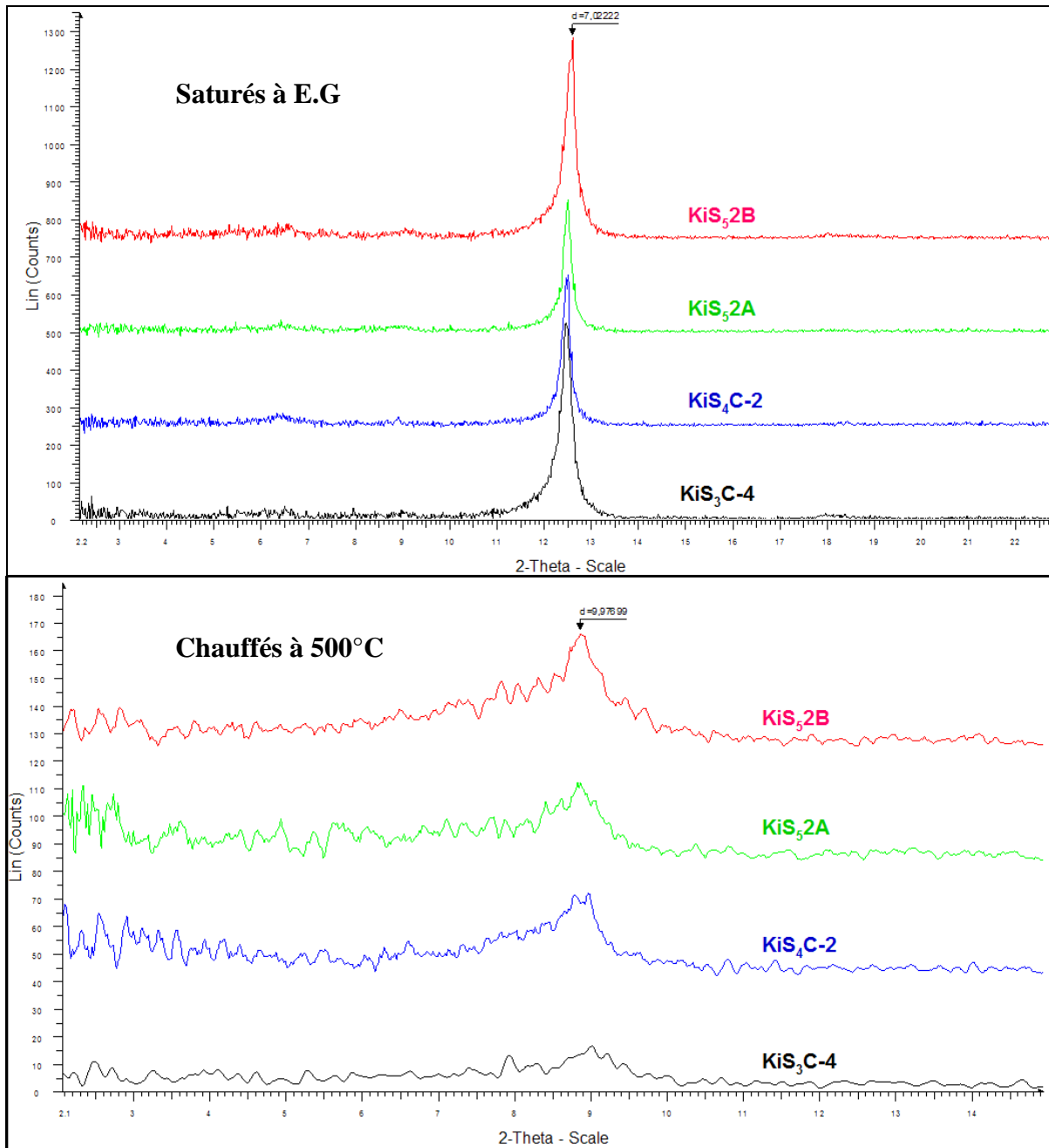


Fig. 87: Diffractogrammes des préparations orientées des matériaux de Kingabwa

Sous l'influence des climats tropicaux humides et chauds couplés aux activités anthropiques incontrôlées, cette architecture morphogénique de la région de Kinshasa est soumise à une intense érosion et à des précipitations élevées. Constituées par les sables ocre ou par les roches gréseuses, les zones collinaires contribuent pour une part prépondérante au capital de sédiments formés des particules, des minéraux ou des solutions. Et lesquels sont transportés (notamment par le fleuve Congo et par la rivière Ndjili qui prend naissance dans le Schistogréseux au Bas-Congo), déposés puis livrés à la sédimentation dans la plaine alluviale. Les minéraux argileux (kaolinite, illite, chlorite) ainsi hérités des zones

collinaires n'ont pas subi d'importantes modifications parce qu'ils sont maintenus, dans ce nouveau milieu, dans des conditions de stabilité relative.

Le processus de transport aurait contribué à la purification des kaolinites par lavage des feuillets ayant occasionné une élimination progressive des ions de fer et un enrichissement en aluminium.

Une étude minéralogique comparative complète des argiles des zones collinaires et celles de la plaine alluviale de Kinshasa et environs pourra confirmer nos hypothèses relatives à la genèse des minéraux argileux de cette région.

IV.4.2. Spectroscopie infrarouge

IV.4.2.1. Matériel et méthode

Les spectres infrarouges ont été enregistrés sur un spectromètre Nicolet NEXUS, dans la gamme de fréquence comprise entre 400 et 4000 cm^{-1} . Le nombre de scans était de 32, avec une résolution de 1 cm^{-1} . L'échantillon (fraction inférieure à 250 μm) a été préparé en pressant une pastille à partir d'un mélange homogène de 2 mg de poudre avec 148 mg de KBr. Cette pastille a été séchée pendant plusieurs heures à 120°C afin de déshydrater les échantillons avant de réaliser la mesure.

Les analyses ont été effectuées sous une purge d'air sec de manière à éviter la contamination par l'eau atmosphérique.

IV.4.2.2. Dépouillement des spectres infrarouges

Comme le diffractogramme de rayons X, le spectre infrarouge dépend de la structure du solide. Les bandes d'absorption infrarouge sont dues aux vibrations des atomes autour de leur position d'équilibre. La masse des atomes, les forces de liaison et leur arrangement dans la molécule ou dans le cristal déterminent la fréquence des vibrations. Ainsi, toute substance définie chimiquement et cristallographiquement possède un spectre infrarouge caractéristique (MAGLIONE G. et CARN M., 1975).

Technique de diagnoses minéralogiques complémentaires à la diffractométrie des rayons X, la spectroscopie infrarouge s'est révélée un outil précieux connu surtout par sa sensibilité à détecter les minéraux très hydratés et à forte instabilité thermique. Même en faibles quantités dans des mélanges polyphasés, la kaolinite est reconnue grâce à ses bandes d'absorption spécifiques ν_{OH} vers 3700 cm^{-1} (BRINDLEY G.W et al., 1986 ; JOUSSEIN E. et al., 2001).

Les vibrations de valence de quatre groupes OH composant la maille élémentaire de kaolinite se traduisent par quatre bandes de vibration centrées sur les fréquences 3695, 3667, 3651, et 3620 cm^{-1} respectivement indexées U_1 , U_2 , U_3 (hydroxyles externes) et U_4 (hydroxyle interne). Les vibrations de déformation du groupe hydroxyle représentant le mouvement des protons par rapport à la liaison Al-O sont indiquées par la présence d'une bande large centrée sur 915 cm^{-1} comportant, sur son flanc hautes fréquences, un épaulement vers 937 cm^{-1} .

Les figures n°88 et 89 illustrent ces deux catégories de vibrations observées respectivement dans les domaines des hautes (a) et des basses (b) fréquences (PETIT S., 1994 ; FIALIPS G.C, 1999).

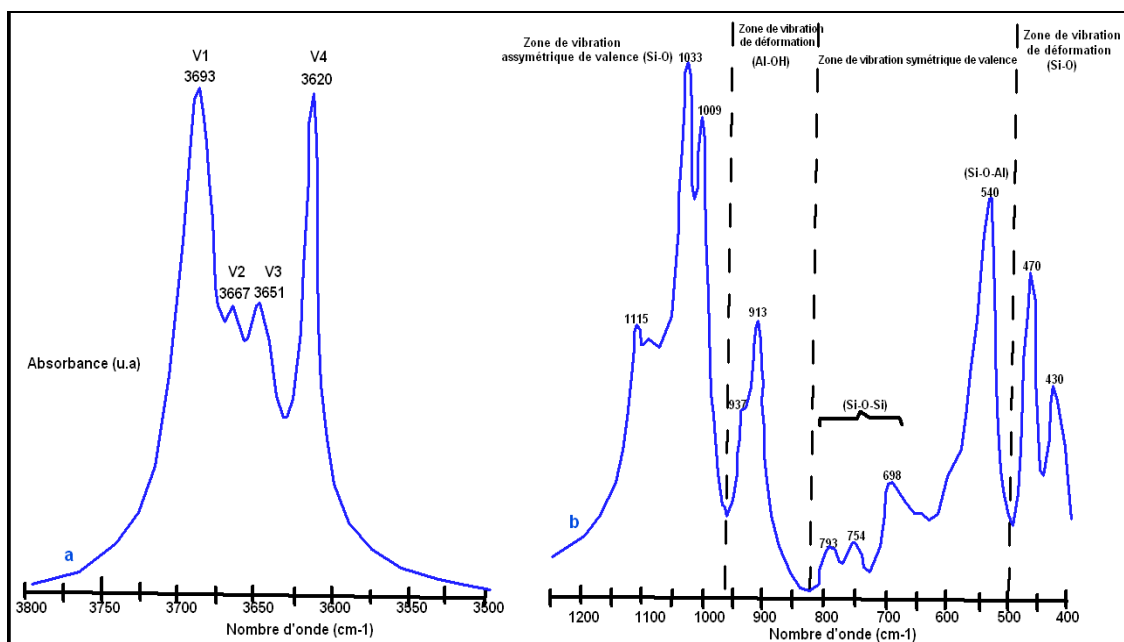


Fig. 88: Spectres IR de la kaolinite KGa-1 de Géorgie (PETIT S., 1994 ; FIALIPS G.C, 1999)

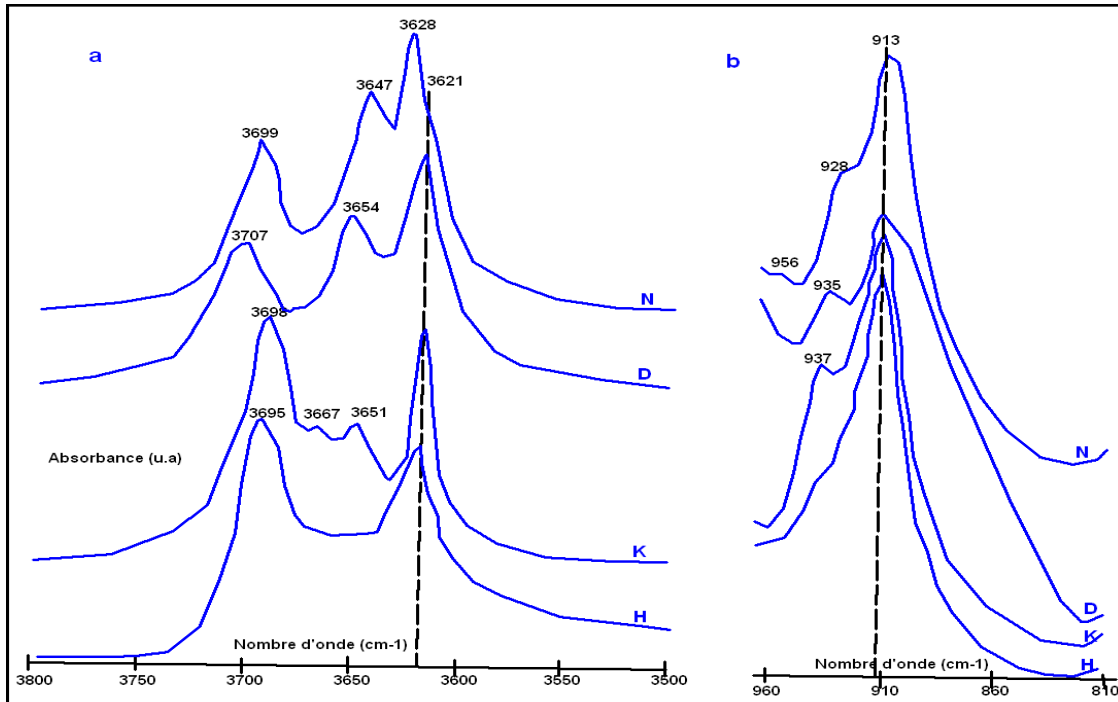
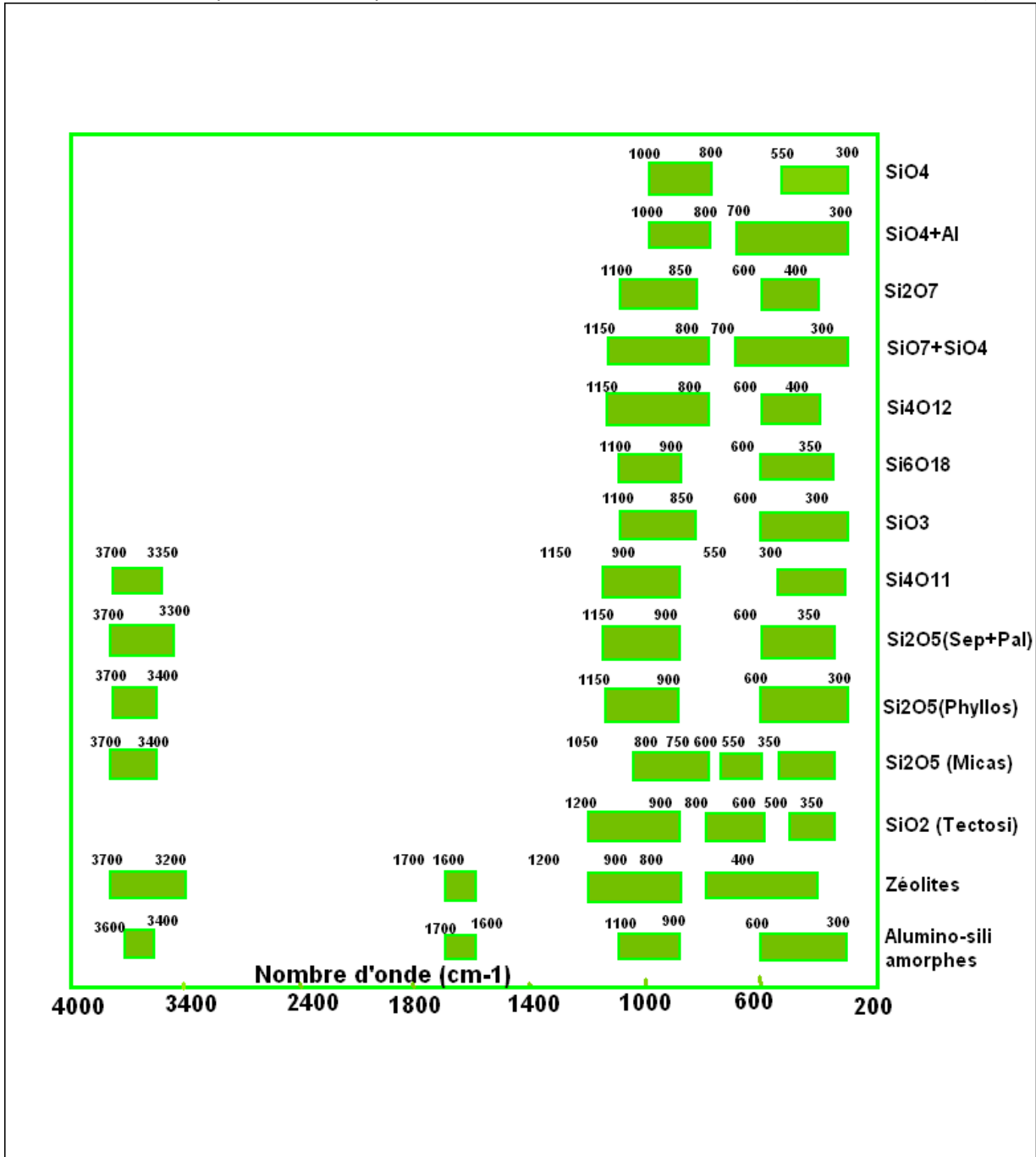


Fig. 89: Spectres IR des minéraux du groupe de la kaolinite (PETIT S., 1994 ; FIALIPS G.C, 1999)
 (N= Nacrite ; D= Dickite de Sainte Claire ; K= Kaolinite KGa-1 de Géorgie et H=Halloysite de Kalinovo)

Le domaine d'absorption majeure des radicaux $(Si_pO_q)_n$ des silicates se situe vers $950-900\text{ cm}^{-1}$ pour les silicates à tétraèdres isolés et vers 1100 cm^{-1} pour les autres. Cette absorption caractéristique se déplace vers les fréquences croissantes avec l'augmentation du degré de condensation des tétraèdres SiO_4 (ALEXANIAN C. et al., 1966). Les fréquences d'absorption de différents radicaux constitutifs des minéraux silicatés sont données dans le tableau n°61 (KODAMA H., 1985).

Tableau 61: Fréquences d'absorption des radicaux des minéraux silicatés (KODAMA H., 1985)



IV.4.2.2.3. Résultats et interprétation

Les figures n°90 et 91 présentent les spectres infrarouges de huit échantillons de matériaux argileux analysés.

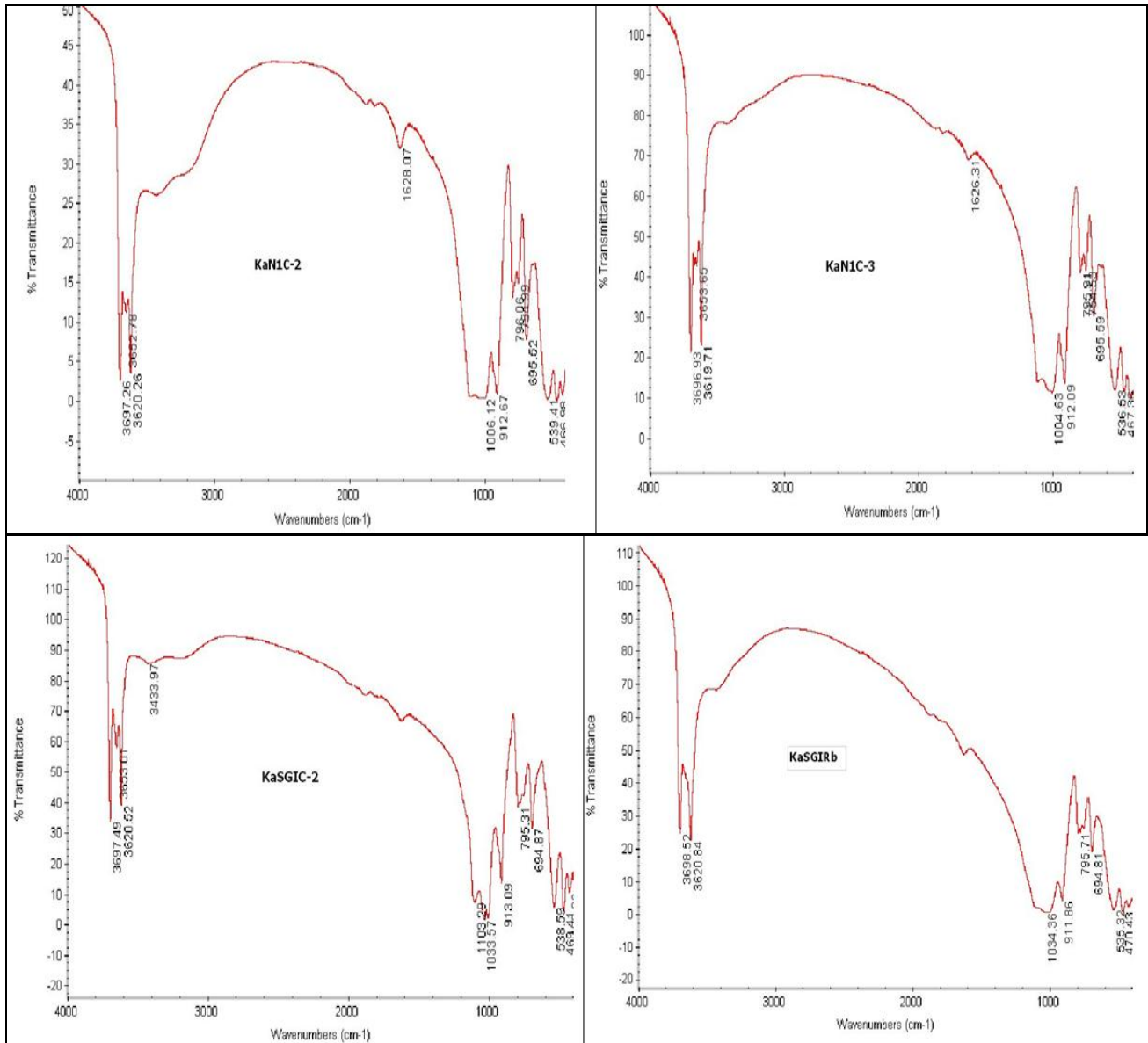


Fig. 90: Spectres infrarouges des matériaux de Kasangulu

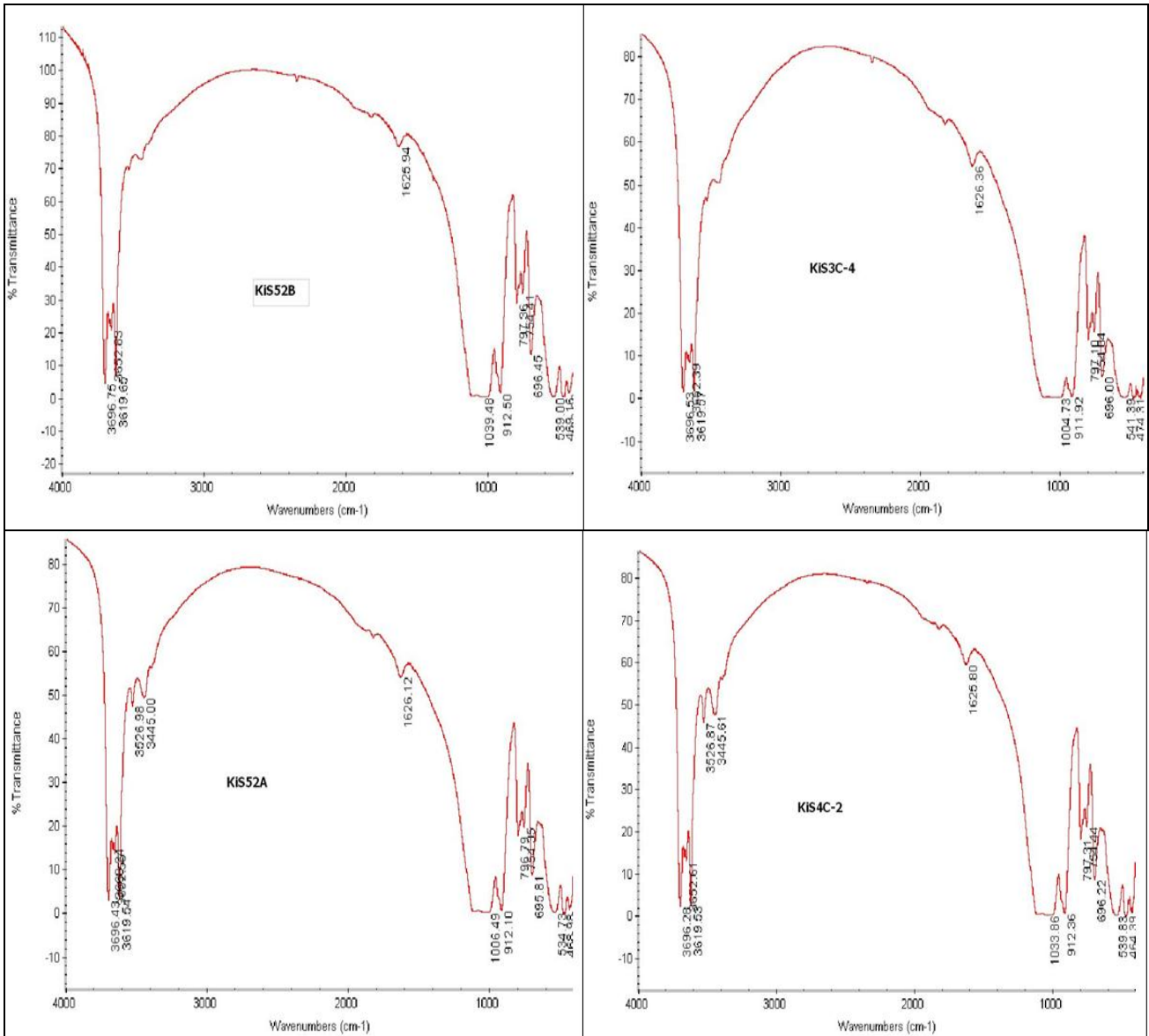


Fig. 91: Spectres infrarouges des matériaux de Kingabwa

Les bandes d'absorption caractéristiques des spectres infrarouges des radicaux les plus importants composants les principaux minéraux des matériaux étudiés sont reprises dans le tableau n°62.

Tableau 62: Bandes d'absorptions caractéristiques des radicaux des matériaux étudiés

Radicaux	Nombre d'onde (en cm^{-1})	Minéraux
OH	3600-3700	Kaolinite
	3400-3600	Illite Chlorite
	≈ 3400 (Bandes larges)	Gibbsite
	≈ 3200 (Bandes larges)	Goethite
H ₂ O	≈ 1600	Alumino-silicates amorphes
SiO ₄	900-1200	Quartz Kaolinite
	400-700	
SiO ₄	750-800	Quartz

Les quatre vibrations caractéristiques du groupe hydroxyle des kaolinites sont bien présentes et localisées au même nombre d'onde :

- ν_1 à $3696\text{-}3698 \text{ cm}^{-1}$;
- ν_2 à 3668 cm^{-1} ;
- ν_3 à $3652\text{-}3654 \text{ cm}^{-1}$;
- ν_4 à $3620\text{-}3621 \text{ cm}^{-1}$.

Alors que les vibrations ν_2 et ν_3 sont absentes dans le matériau peu altéré de KaSGIRb, celle ν_2 ne se trouve pas dans tous les matériaux de Kasangulu. Cette observation s'accorde avec l'occurrence des minéraux du groupe de kaolinites de type dickite et nacrite mais présentant un réseau cristallin mal organisé.

Les bandes d'absorption relativement larges localisées à 3527 cm^{-1} et à 3445 cm^{-1} observées sur les spectres infrarouges des matériaux de Kingabwa sont liées à des phyllosilicates autre que la kaolinite tels que l'illite et/ou la chlorite.

Les vibrations de déformation de la liaison Al-O sont localisées à 912 et 913 cm^{-1} . Des larges bandes d'absorption de faible intensité centrées autour de 1626 cm^{-1} sur tous les matériaux analysés sont attribuées à des molécules d'eau ou éventuellement aux autres radicaux constitutifs des aluminosilicates amorphes ; l'eau d'hydratation étant déjà évacuée lors du chauffage pendant la préparation des échantillons.

La superposition (en échelle arbitraire en ordonnée) des spectres infrarouges (Fig.92) de tous les matériaux montre une bonne concordance tant au sein d'un même puits que entre les différents profils de deux sites pilotes d'étude. Cette similitude des spectres infrarouges traduit une cristallinité homogène des kaolinites des matériaux analysés.

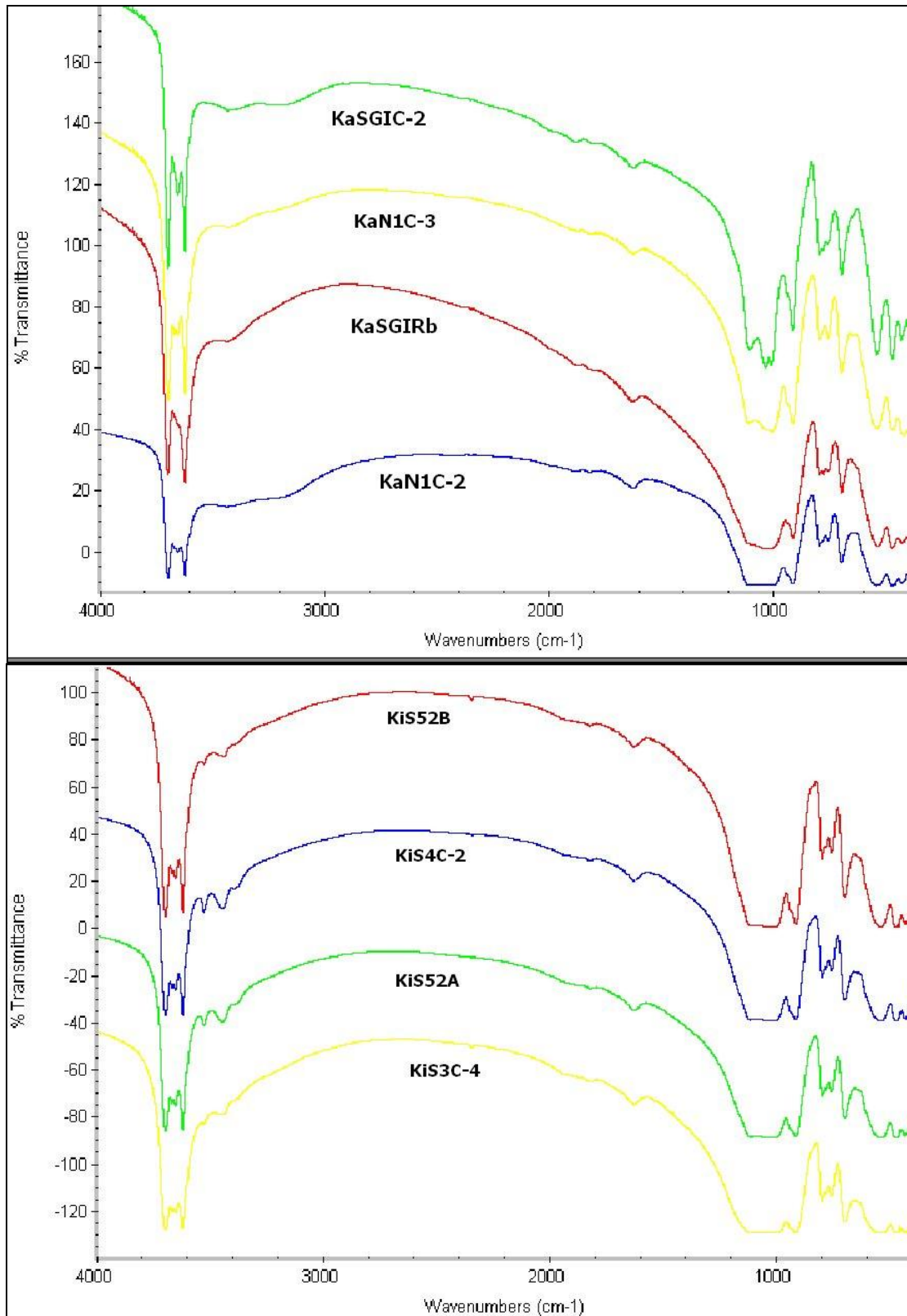


Fig. 92: Superposition des spectres infrarouges de matériaux étudiés

IV.5. Conclusions partielles

Des ressources minérales non-métalliques dont les matériaux argileux de Kinshasa et environs ont fait l'objet des caractérisations géotechniques, microscopiques, chimiques, et minéralogiques en vue d'identifier le potentiel de valorisation industrielle la plus appropriée. Cette application a été menée essentiellement sur les matériaux extraits des deux sites pilotes : Kasangulu et Kingabwa.

IV.5.1. Matériaux naturels du site pilote de Kasangulu

D'une teneur en eau naturelle comprise entre 10 et 20% avec un équivalent de sable variant de 10 à 14%, les sols de Kasangulu sont des matériaux argileux (2 à 32% d'argiles) plastiques (I_p : 16-27 ; W_L < 50% ; W_S : 14-21%), inorganiques (M.O < 1%), très consistants (I_c : 1,18-1,44), maigres, limoneux (11 à 42% de limons), sableux (14 à 32% de sables fins et 24 à 35% de sables grossiers) et latéritisés.

Ces matériaux sont composés d'un assemblage minéralogique dominé par la kaolinite, le quartz, la muscovite ou l'illite, la goethite, la gibbsite, les feldspaths alcalins et la chlorite.

Du point de vue chimique, ces matériaux sont caractérisés par de teneurs en :

- silice (SiO_2) : 62 à 71% ;
- alumine (Al_2O_3) : 10 à 22% ;
- sesquioxyde de fer (Fe_2O_3) et oxyde de titane (TiO_2) : 2 à 7% ;
- oxydes alcalins ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) inférieures à 2% pour les produits les plus altérés ;
- oxydes alcalino-terreux ($\text{CaO} + \text{MgO}$) inférieures à 1% ;
- métaux lourds (Pb, Cu, Co, Zn) trop faibles (inférieures à 0,2%).

Avec ces caractéristiques, les matériaux argileux de Kasangulu sont des produits silico-argileux et constituent des ressources minérales premières de bonne qualité pour la fabrication des briques cuites ou stabilisées et éventuellement des tuiles.

La présence de la goethite associée à l'oxyde de titane dans ces produits naturels apporte une plus-value considérable dans la teinture rougeâtre des produits finis.

Les teneurs en oxyde de fer couplées aux faibles teneurs en oxydes alcalins et alcalino-terreux conditionneront la fusibilité et donc l'aptitude à donner des produits suffisamment grésés pour présenter des caractéristiques utiles (porosité, perméabilité et résistance mécanique) satisfaisantes. Mais la présence de sables trop grossiers dans ces matériaux naturels peut entraîner des problèmes de

perméabilité dans les tuiles. Des tuiles de bonne qualité doivent donc dériver de mélanges optimaux des produits naturels.

Afin d'obtenir des blocs de haute densité et de minimiser la quantité de stabilisant, il est souhaitable de procéder au mélange des matériaux des couches 2 et 3 sur le même profil avec une teneur en eau optimale variant entre 14 et 16%.

Notons aussi que la composition chimique des matériaux argileux de Kasangulu a montré des similitudes intéressantes avec celles de quatre argiles types utilisées dans l'industrie de la briqueterie européenne.

Dans tous les cas, les courbes granulométriques sont continues et ne décèlent pas de gros déficits dans une quelconque tranche granulométrique, ce qui doit contribuer à obtenir des textures denses et donc également à la fabrication des produits finis résistants.

Sous un climat tropical (chaud et humide) et suite à l'implication des eaux météoriques, les matériaux argileux de Kasangulu se sont formés, in situ, par altération (lessivage) de la roche gréseuse d'Inkisi.

IV.5.2. Matériaux naturels du site pilote de Kingabwa

Les matériaux naturels extraits du site de Kingabwa correspondent aux argiles inorganiques (M.O <1%), grasses, de consistance plastique (I_c : 0,52-0,89), très plastiques (I_p : 36-50 ; W_s : 16-21% ; W_L >50%).

Comme pour les matériaux de Kasangulu, les argiles de Kingabwa ont un poids volumique voisin de 2,6 et un pH variant entre 4,00 et 4,33.

Les matériaux argileux de Kingabwa comprennent essentiellement deux fractions granulométriques : argiles (42 à 59%) et limons (41 à 54%). La quasi-totalité (plus de 90%) de ces matériaux est constituée des particules de diamètre inférieur à 50 μ m ; 76 à 96% de particules ont une taille inférieure ou égale à 10 μ m.

Ces matériaux titrent :

- entre 50 et 59% de la silice (SiO_2) ;
- environ 30% d'alumine (Al_2O_3) ;
- entre 1 et 2% de sesquioxyde de fer (Fe_2O_3) et environ 1% d'oxyde de titane (TiO_2) ;
- autour de 1% d'oxydes alcalins ($Na_2O + K_2O$) et moins de 1% d'alcalino-terreux ($CaO + MgO$) ;
- moins de 0,2% de métaux lourds (Pb, Cu, Co, Zn).

La kaolinite de bonne cristallinité et de grande pureté reste le minéral le plus abondant et lequel est accompagné du quartz, de l'illite et de la chlorite.

Les caractéristiques physico-chimiques des matériaux argileux de Kingabwa montrent qu'ils constituent d'importantes ressources minérales premières dans la filière de la céramique fine ; ils peuvent donc entrer dans la formulation de certains produits céramiques tels que émaux, vitreous, porcelaine ou réfractaires silico-alumineux pour des produits blancs.

Ces argiles kaolinitiques brutes de Kingabwa présentent de ressemblances chimiques avec les deux kaolins commerciaux bien connus venant du gisement anglais de Cornwall dont l'un, kaolin de haute qualité, est utilisé pour la fabrication de la porcelaine et comme charge minérale des matériaux composites et l'autre pour la production des céramiques sanitaires et comme matière première des réfractaires silico-alumineux. Par simple tri granulométrique et/ou broyage éventuel, le problème d'éventuelles particules de taille supérieure à 50 μ m peut trouver solution.

Les matériaux argileux de Kingabwa seraient des produits d'héritage des zones collinaires environnantes qui ont sédimenté en plein cœur de la plaine alluviale de la rivière Ndjili sous des conditions fluviales.

CHAPITRE V : FABRICATION ET CARACTERISATION DES BRIQUETTES EXPERIMENTALES

V.1. Introduction

A cause de leurs diverses propriétés physico-chimiques, les argiles ont été utilisées depuis la plus haute antiquité et déjà par nos ancêtres de la préhistoire pour la fabrication des poteries rudimentaires. De nos jours, l'utilisation de ces matériaux connaît un nouvel essor dans de nombreux secteurs industriels, en l'occurrence la céramique et le bâtiment (MURRAY H.H., 2000 ; NKOUMBOU C. et al., 2001 ; BARRIOS NEIRA J. et al., 2009).

Ces matériaux se retrouvent dans la Province de Kinshasa et ses environs. Mais, mises à part leurs utilisations artisanales, ces argiles n'ont connu que trop peu d'exploitation industrielle suite notamment au manque des études scientifiques adéquates.

Des matériaux argileux kaolinitiques échantillonnés dans les puits d'exploitation artisanale de deux sites pilotes retenus, Kasangulu et Kingabwa, ont servi à la fabrication des produits céramiques sous forme des briquettes expérimentales stabilisées ou cuites jusqu'à 1150°C. Les caractéristiques technologiques et minéralogiques des produits céramiques ainsi élaborés permettent, comme l'ont montré les résultats de travaux de caractérisations physico-chimiques et géotechniques, de justifier l'emploi des substances premières dans l'industrie céramique.

V.2. Fabrication

La fabrication des briquettes expérimentales stabilisées et cuites est réalisée dans les installations industrielles de CERATEC à Ploegsteert. Les protocoles expérimentaux de cette entreprise ont été utilisés (CERATEC, 1987 et 1997).

V.2.1. Briquettes cuites

Les produits cuits ont été fabriqués selon les étapes suivantes :

- la préparation ;
- le façonnage ;
- le séchage ;
- la cuisson.

V.2.1.1. Préparation

Avant de former des pâtes propres à la fabrication des produits finis, les matériaux argileux extraits de Kasangulu et de Kingabwa ont été travaillés et ont subis les opérations suivantes :

- formation des mélanges ;
- élimination des impuretés ;
- fragmentation ;
- homogénéisation et humidification.

Deux mélanges des produits naturels optimisés pendant les travaux de caractérisations antérieures ont été utilisés pour la fabrication des produits finis. Il s'agit de :

- 5Kg KiS₅2A + 5Kg KiS₅2B pour les matériaux issus de Kingabwa;
- 7Kg KaN₁C-2 + 5Kg KaN₁C-3 pour ceux de Kasangulu.

Les produits naturels mélangés sont débarrassés manuellement de toutes les impuretés ou corps étrangers nuisibles, principalement les morceaux de racines de plantes. Bien que n'ayant pas d'effet abrasif sur les appareils, les racines, grâce à leur élasticité, passent partout sans être déchiquetées. Elles finissent par se bloquer aux grilles des mouleuses ou au niveau des filières, entraînant ainsi des perturbations dans la fabrication. Lors de la cuisson, ces fragments de racines peuvent brûler et occasionner de porosités importantes dans les produits finis.

Dans le but de diminuer les dimensions des mottes d'argiles et d'offrir une plus grande surface de contact aux différents constituants, les échantillons de mélange sont passés plusieurs fois au laminoir à rouleaux (Fig.93). Le travail de laminoir a été facilité par l'ajout d'une certaine quantité d'eau pour les matériaux de Kasangulu ; ceux de Kingabwa, trop humides, n'ont pas nécessité d'adjonction d'eau.



Fig. 93: Fragmentation au laminoir des matériaux de Kingabwa et de Kasangulu

L'homogénéisation a été faite manuellement à l'aide d'une petite pelle dans une caisse à échantillon.

Pour une bonne humidification des matériaux, les deux caisses à échantillons ont été recouvertes des bâches plastiques durant environ 13h (Fig.94). En effet, l'eau qui s'évapore dans la caisse se fixe sur le film plastique et, en retombant, la vapeur d'eau qui se répand uniformément sur l'ensemble du matériau, entre en contact avec l'argile froide. Elle se condense en cédant sa chaleur de vaporisation ; la pâte s'échauffe en s'humidifiant.



Fig. 94: Humidification des matériaux de Kingabwa et de Kasangulu

Ces deux derniers stades de préparation permettent de :

- achever le processus de mélange de composants ;
- donner aux produits la consistance plastique optimale, obtenue par humidification jusqu'à teneur en eau voulue ;
- chasser en partie l'air incorporé à la pâte.

V.2.1.2. Façonnage

Les pâtes homogènes et plastiques obtenues lors de la préparation sont façonnées à l'étireuse en utilisant deux filières : l'une pour produire les briquettes pleines et l'autre pour les produits creux ou perforés.

Ces pâtes ont été soumises aux essais d'extrusion réalisés en utilisant une étireuse sous vide de laboratoire sous les conditions suivantes (Fig.95) :

- diamètre d'extrusion 50mm ;
- vide obtenu à plus ou moins 90%.



Fig. 95: Etirage sous vide des produits perforés de Kasangulu

V.2.1.3. Séchage

Les produits venant d'être façonnés à l'étréage sous vide contiennent encore une certaine quantité d'eau. Avant de pouvoir les cuire, il est nécessaire de les sécher. Ces produits ont ainsi été séchés dans un séchoir artificiel (ou forcé), en chambres (chambre 02), au sein des unités de production industrielles « AFMA » de CERATEC avec un cycle de séchage de 133h25. La régulation et le suivi d'une courbe de séchage sont assurés par un système de supervision automatique. Le brassage de l'air à l'intérieur des chambres est transversal et assuré par des « Dual Air Jets ». Les conditions de réalisation de ce séchage sont données dans le tableau n°63.

Tableau 63: Paramètres de séchage des briquettes à la chambre 02

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne
Position clapet (% d'ouverture maximale)	0	93	48
Température (°C)	22	68	44
Pouvoir séchant réel	17	2645	484
Humidité relative (%)	9	95	60

Les paramètres du tableau n°63 représentent les grandeurs suivantes :

- la position du clapet est une position d'un registre permettant de régler ou de réguler la quantité d'air chaud entrant dans le séchoir ;
- l'humidité relative est l'humidité de l'air divisée par l'humidité maximale de l'air à une température donnée (point de rosée) ;
- le pouvoir séchant est une grandeur calculée sur base de la température et de l'humidité relative de l'air de séchage ; proportionnelle à la température et inversement proportionnelle à l'humidité relative, elle mesure l'agressivité de l'air de séchage par rapport aux produits à sécher (sa formule est confidentielle à l'entreprise Ceratec).

V.2.1.4. Cuisson

Les produits secs (issus du séchage) de Kasangulu et de Kingabwa ont été cuits dans un four de laboratoire électrique de marque Keller. Il est relié à un automate programmable qui permet de programmer et de suivre la courbe de cuisson voulue. Différents cycles (durée de 40h) de cuisson ont été utilisés en faisant varier la température du palier de cuisson : 950, 1000, 1050, 1100 et 1150°C.

La courbe de cuisson utilisée se présente de la manière suivante (Tabl.64).

Tableau 64: Plages de température utilisées pour la cuisson des briquettes

Plage de température	Vitesse de cycle de 40h
De 20 à 600°C	+50°C/h
De 600 à T_{max} °C	+25°C/h
Palier à T_{max} °C	3 heures
De T_{max} à 600°C	-50°C/h
De 600 à 500°C	-25°C/h
De 500 à 20°C	Libre

V.2.2. Briquettes stabilisées

Le mélange de 7Kg KaN_1C-2 + 5Kg KaN_1C-3 des matériaux naturels de Kasangulu a servi à l'élaboration des briquettes stabilisées au ciment. Les opérations de préparations sont approximativement les mêmes que celles utilisées pour la fabrication des produits cuits. Néanmoins, quelques particularités méritent d'être mentionnées :

- 5% en poids de ciment portland est ajouté au mélange de matériaux naturels désagrégés ;
- lorsque le mélange « matériaux naturels-ciment » est homogène, une quantité de l'eau est rajoutée uniformément jusqu'à l'obtention d'une humidité optimale (12 à 15%). Cette dernière est estimée en prenant une poignée de matériau que l'on comprime bien dans la main et que l'on laisse tomber d'une hauteur d'environ 1,10m, sur une surface plane et dure : la boule de matériau se casse en 4 ou 5 morceaux ;
- le façonnage est réalisé dans une presse manuelle une heure environ après addition d'eau au mélange ;
- les blocs fraîchement pressés ont mis deux semaines pour durcir en les recouvrant d'une bâche plastique.

V.3. Caractéristiques technologiques

V.3.1. Produits de cuisson

V.3.1.1. Coloration

A l'issue des cycles de cuisson utilisés, les briquettes obtenues ont présenté les colorations (Fig.96) reprises dans le tableau n°65.

Tableau 65: Colorations des produits de cuisson

Température de cuisson (°C)	Colorations des produits	
	Kasangulu (Ka)	Kingabwa (Ki)
950	Orange pâle	Blanche
1000	Orange pâle	Blanche
1050	Orange	Blanche
1100	Rouge brique	Blanc-crème
1150	Rouge brique	Blanc-crème



Fig. 96: Colorations des briquettes expérimentales cuites

Les produits de cuisson de Kasangulu et de Kingabwa ont de teintures à incidence commerciale positive très importante pour une utilisation dans l'industrie céramique (EZBAKHE H. et al., 2001 ; NKOUMBOU C. et al., 2001 ; SARHIRI A., 2003).

V.3.1.2. Teneur en eau à l'étirage

Les teneurs en eau de façonnage sont obtenues en faisant la différence entre les masses humides et les masses sèches (Tabl.66 et 67 ; Fig.97).

Tableau 66: Teneurs en eau de façonnage des briquettes expérimentales de Kasangulu

Briquettes	N°	Masses humides (g)	Masses sèches (g)	Eau de façonnage (%)
PLEINES	1	228,9	174,2	24
	2	228,7	173,9	24
	3	229,5	174,5	24
	4	229,1	174,2	24
	5	229	174,1	24
	6	229,3	174,6	23
	7	229,1	174,4	23
	8	229,1	174,4	23
	9	228,8	174,2	23
	10	228,8	174,2	23
	11	228,7	174	24
	12	229,4	174,3	24
	13	229,4	174,2	24
	14	229,1	173,9	24
	15	229	173,9	24
	16	228,8	173,7	24
	17	229	174	24
	18	229,3	174,8	23
	19	228,3	173,6	24
	20	229,3	174,6	23
	21	229,3	174,5	24
	22	229,4	174,6	23
	23	229	174,2	24
	24	228,7	173,9	24
	25	228,6	173,7	24
	26	228,5	173,6	24
	27	228,3	173,4	24
	28	228,8	173,5	24
	29	228,6	173,8	24
	30	228,4	173,5	24
	31	228,5	173,6	24
	32	228,3	173,6	24
PERFOREES	1	252,1	191,8	24
	2	252,2	191,9	24
	3	251,8	191,4	24
	4	252,3	192	24
	5	252,7	192,2	24
	6	252,4	192,1	23
	7	251,9	191,6	24
	8	252	191,8	23
	9	252,1	192	23

Tableau 67: Teneurs en eau de façonnage des briquettes expérimentales de Kingabwa

Briquettes	N°	Masses humides (g)	Masses sèches (g)	Eau de façonnage (%)
PLEINES	1	204,4	137,6	32
	2	204,2	137,5	32
	3	205	138,2	32
	4	204,9	138,3	32
	5	204,6	138,1	32
	6	204,4	137,9	32
	7	204,6	138	32
	8	205,1	138,8	32
	9	205,4	139,2	32
	10	205,6	139,5	32
	11	205,3	139,2	32
	12	205,4	139,4	32
	13	206,3	140,2	32
	14	205,5	139,6	32
	15	205,7	139,9	32
	16	205	138,7	32
	17	205,4	139,5	32
	18	204,3	137,9	32
	19	204,4	137,9	32
	20	205,4	138,4	32
	21	204,6	138	32
	22	204,9	138,5	32
	23	205,2	139,1	32
	24	205	138,9	32
	25	205,3	139,5	32
	26	205,6	139,8	32
	27	205,4	139,7	32
	28	204,4	139,7	31
	29	205	139,2	32
	30	204,9	139	32
	31	204,9	139,1	32
	32	205	139,4	32
PERFOREES	1	224,8	153,2	31
	2	225,1	153,6	31
	3	225,4	154,4	31
	4	224,9	153,6	31
	5	224,9	153,1	32
	6	224,7	153,1	31
	7	225,7	153,8	31
	8	225,2	153,1	32
	9	225,2	153,2	32

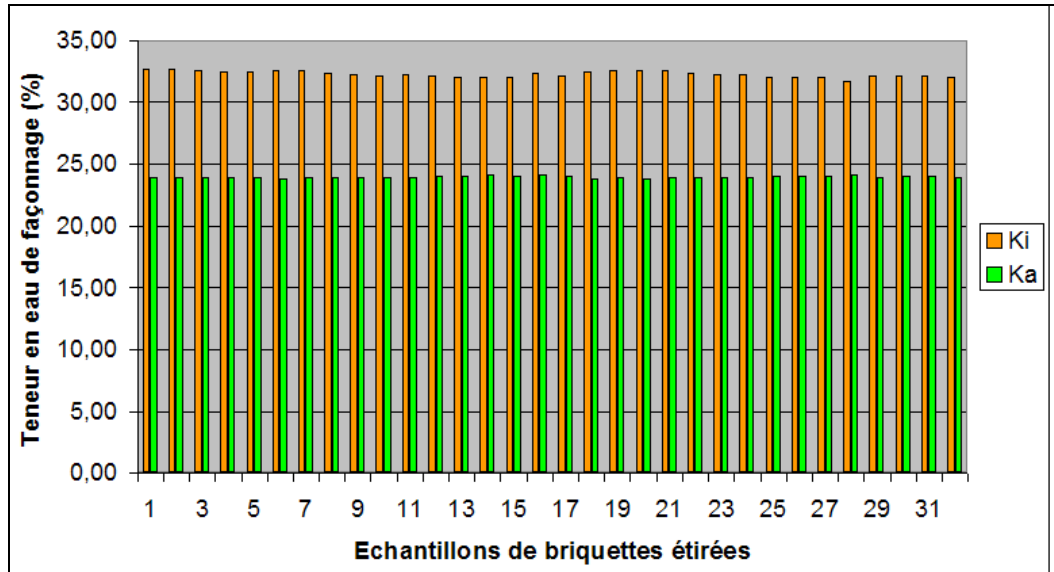


Fig. 97: Teneurs en eau de façonnage des briquettes expérimentales pleines

Les briquettes pleines et perforées de Kasangulu titrent en moyenne 24% d'eau à l'étirage contre 32% et 31% pour celles de Kingabwa. A l'étirage, les boudins ont présenté une bonne cohésion et une très bonne plasticité. Les produits étirés sont très beaux, sans aucun défaut.

V.3.1.3. Retrait au séchage

Les pourcentages de retrait au séchage sont obtenus par différence des longueurs entre les deux traits enregistrés sur les briquettes avant séchage (longueurs initiales) avec les longueurs entre les deux traits mesurés sur les briquettes après séchage (longueurs finales). Les résultats de cet essai sont consignés dans les tableaux 68 et 69 et sur la figure n°98.

Tableau 68: Retraits au séchage des briquettes expérimentales de Kasangulu (Ka)

Briquettes	N°	Longueur initiale (mm)	Longueur finale (mm)	Retrait au séchage (%)
PLEINES	1	115	106	8
	2	115	106	8
	3	115	106	8
	4	115	106	8
	5	115	106	8
	6	115	105	8
	7	115	106	8
	8	115	105	8
	9	115	105	8
	10	115	105	8
	11	115	105	8
	12	115	106	8
	13	115	106	8
	14	115	106	8
	15	115	106	8
	16	115	106	8
	17	115	106	8
	18	115	106	8
	19	115	106	8
	20	115	106	8
	21	115	106	8
	22	115	105	8
	23	115	106	8
	24	115	105	8
	25	115	105	8
	26	115	105	8
	27	115	105	8
	28	115	105	8
	29	115	106	8
	30	115	105	8
	31	115	106	8
	32	115	106	8
PERFOREES	1	115	105	8
	2	115	106	8
	3	115	105	8
	4	115	106	8
	5	115	106	8
	6	115	106	8
	7	115	106	8
	8	115	105	8
	9	115	106	8

Tableau 69: Retraits au séchage des briquettes expérimentales de Kingabwa (Ki)

Briquettes	N°	Longueur initiale (mm)	Longueur finale (mm)	Retrait au séchage (%)
PLEINES	1	115	103	10
	2	115	103	10
	3	115	104	9
	4	115	103	10
	5	115	103	10
	6	115	103	10
	7	115	103	10
	8	115	103	10
	9	115	103	10
	10	115	104	9
	11	115	103	10
	12	115	104	9
	13	115	104	9
	14	115	104	9
	15	115	103	10
	16	115	103	10
	17	115	103	10
	18	115	103	10
	19	115	103	10
	20	115	103	10
	21	115	103	10
	22	115	103	10
	23	115	103	10
	24	115	103	10
	25	115	103	10
	26	115	103	10
	27	115	104	9
	28	115	103	10
	29	115	103	10
	30	115	103	10
	31	115	103	10
	32	115	103	10
PERFOREES	1	115	105	8
	2	115	105	8
	3	115	105	8
	4	115	105	8
	5	115	104	9
	6	115	105	8
	7	115	105	8
	8	115	104	9
	9	115	105	8

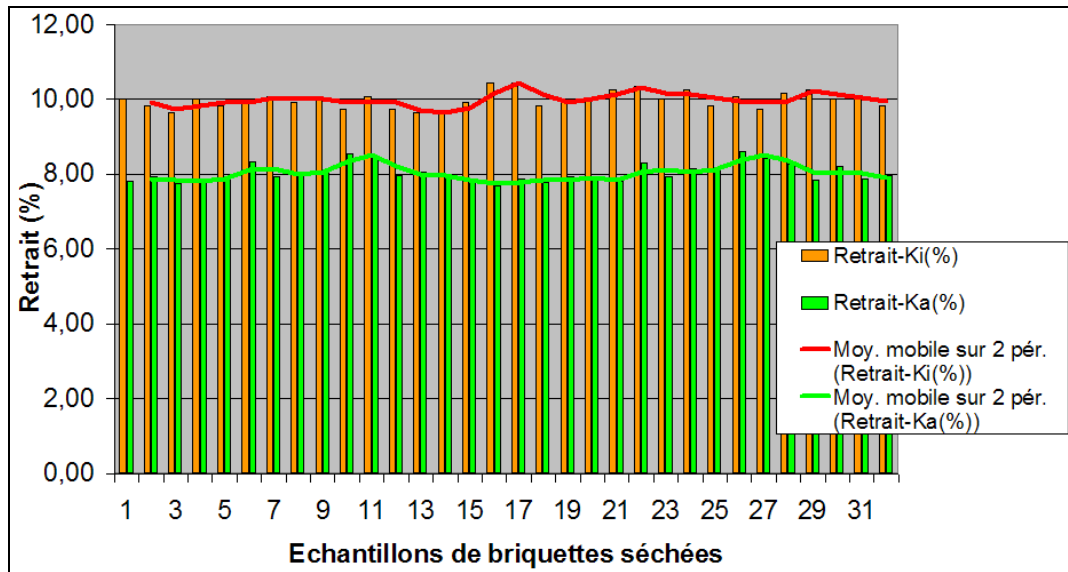


Fig. 98: Retraits au séchage des briquettes expérimentales pleines

A la lumière de ces résultats, les observations suivantes peuvent se dégager :

- les retraits déterminés correspondent aux valeurs moyennes habituellement rencontrées. Les briquettes de Kingabwa, issues des matériaux très plastiques et trop pauvres en sable, ont présenté des pourcentages de retrait élevés dont la moyenne est de 10% pour les briquettes pleines et 8% pour les perforées ; celles de Kasangulu titrent 8% en moyenne ;
- les produits secs sont parfaits, aucune fissure n'a été observée macroscopiquement lors du séchage.

Puisque les briquettes de deux sites pilotes ont été soumises aux mêmes conditions de façonnage (ont subi le même degré de compression lors de la mise en forme dans la filière) et de séchage (même humidité), les plus grandes valeurs de retrait des produits de Kingabwa par rapport à ceux de Kasangulu sont liées à la nature des argiles constitutives et leur finesse.

En effet, lors de l'élimination de l'eau, les particules argileuses se rapprochent les unes des autres, s'enchevêtrent jusqu'à ce qu'elles soient en contact et ne puissent donc plus se déplacer. Ce rapprochement des particules provoque une densification, un tassement de la matière, qui entraîne une contraction représentant le phénomène de retrait. Il est d'autant plus important que les particules étaient initialement plus distantes les unes des autres : ceci explique que, pour une argile donnée, plus le pourcentage d'eau contenu dans la pâte de façonnage est grand, plus le retrait est important. De même, plus les particules sont fines, mieux elles peuvent s'imbriquer dans les anfractuosités laissées par leurs voisines, donc plus

leur « tassement » est important et plus fort le retrait. C'est ce qui caractérise les matériaux de Kingabwa (CERATEC, 1997).

Au contraire, la présence de particules grossières, contenues dans les matériaux de Kasangulu, entraîne un plus rapide contact, donc un moindre retrait.

V.3.1.4. Retrait à la cuisson

La détermination des pourcentages de retrait à la cuisson se fait par l'étude de la variation de la moyenne des longueurs des traits enregistrés sur les briquettes entre le séchage et la cuisson à différentes températures (950, 1000, 1050, 1100 et 1150°C). La formule ci-après est utilisée pour calculer les pourcentages de retraits à la cuisson (R_C) :

$R_C = (L_s - L_{ct}/L_s) \times 100$ dans laquelle :

L_s est la longueur au séchage et L_{ct} celle à la cuisson à une température déterminée t .

Les valeurs des retraits à différentes températures de cuisson expérimentées sont données dans les tableaux n°70 et 71 et sur la figure n°99.

Tableau 70: Retrait à la cuisson des briquettes expérimentales de Kasangulu (Ka)

Tmax (C°)	Briquettes	Longueur initiale (mm)	Longueur finale (mm)	Retrait (%)	Moyenne (%)
950	Pleine 1	106	105,5	0,4	0,4
	Pleine 2	105,8	105	0,6	
	Pleine 3	106	105,8	0,2	
	Pleine 4	105,9	105,6	0,2	
	Pleine 5	105,9	105	0,5	
	Perforée 1	105,4	105	0,3	0,3
	Perforée 2	105,9	105,6	0,2	
1000	Pleine 6	105,4	105	0,1	0,2
	Pleine 7	105,8	105,8	0,0	
	Pleine 8	105,7	105,5	0,2	
	Pleine 9	105,6	105	0,4	
	Pleine 10	105,6	105	0,2	
	Perforée 3	105,7	105	0,6	0,7
	Perforée 4	105,8	104,8	0,8	
1050	Pleine 11	105,2	104,8	0,4	1
	Pleine 12	105,8	104,8	1	
	Pleine 13	105,7	104,8	1	
	Pleine 14	105,9	104,6	1,2	
	Pleine 15	106	105	1	
	Perforée 5	106,3	105	1,1	1,2
	Perforée 6	106	104,8	1,3	
1100	Pleine 26	105	100,6	4,2	4,3
	Pleine 27	105,3	101	4	
	Pleine 28	105,4	100,8	4	
	Pleine 29	105,9	101	4,5	
	Pleine 30	105,5	101	4,1	
	Perforée 9	105,8	100,6	5	5
	1150	Pleine 21	106	100,6	5
Pleine 22		105,4	100,5	4,6	
Pleine 23		105,8	100,8	4,7	
Pleine 24		105,6	100	5	
Pleine 25		105,6	100	5,2	
Perforée 8		105,5	100,6	4,6	4,6

Tableau 71: Retrait à la cuisson des briquettes expérimentales de Kingabwa (Ki)

Tmax (C°)	Briquettes	Longueur initiale (mm)	Longueur finale (mm)	Retrait (%)	Moyenne (%)
950	Pleine 1	103,5	100,8	2,6	2,7
	Pleine 2	103,7	101	2,6	
	Pleine 3	103,9	101	2,7	
	Pleine 4	103,5	100,8	2,7	
	Pleine 5	103,7	100,8	2,8	
	Perforée 1	105,1	102,3	2,6	2,7
	Perforée 2	105,6	102,6	2,8	
1000	Pleine 6	103,5	101	2,4	2,6
	Pleine 7	103,4	100,4	2,8	
	Pleine 8	103,6	100,7	2,7	
	Pleine 9	103,4	101	2,4	
	Pleine 10	103,8	101	2,6	
	Perforée 3	105	102	2,7	2,5
	Perforée 4	105,1	102,7	2,2	
1050	Pleine 11	103,4	99,7	3,5	3,7
	Pleine 12	103,8	99,4	4,2	
	Pleine 13	103,9	100	3,8	
	Pleine 14	103,9	100	3,5	
	Pleine 15	103,6	100	3,3	
	Perforée 5	104,8	101	3,4	3,6
	Perforée 6	105,6	101,5	3,8	
1100	Pleine 26	103,4	93,6	9,4	9,5
	Pleine 27	103,8	93,5	9,9	
	Pleine 28	103,3	93,5	9,4	
	Pleine 29	103,2	93,5	9,4	
	Pleine 30	103,5	93,6	9,5	
	Perforée 9	105,5	95,6	9,3	9,3
1150	Pleine 21	103,2	90,4	12,4	12,3
	Pleine 22	103,1	90,6	12	
	Pleine 23	103,5	90,7	12,3	
	Pleine 24	103,2	90,5	12,3	
	Pleine 25	103,7	91	12,2	
	Perforée 8	104,7	92,5	11,6	11,6

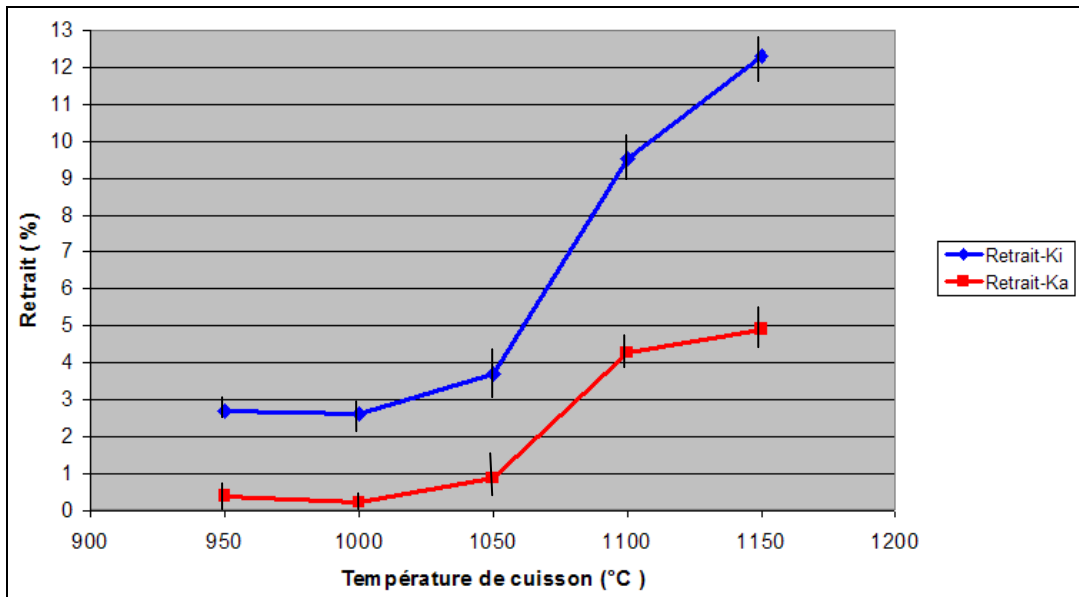


Fig. 99: Variation de retraits des briquettes pleines avec la température de cuisson (en valeurs minimales, moyennes et maximales)

Les résultats obtenus montrent que :

- entre 950 et 1050°C il y a une variation faible ou quasi-uniforme des retraits avec la température ;
- à partir de 1050°C, on assiste à une forte augmentation du retrait à faible variation de la température.

Pour les matériaux de Kingabwa utilisables dans la filière de la céramique fine ou dans bien d'autres secteurs industriels exigeant des températures de cuisson plus importantes (par exemple supérieures à 1050°C), le retrait à la cuisson de 10 à 12% est légèrement trop élevé. La correction par l'ajout d'un dégraissant (sable, feldspath, pegmatites ou autre substance à caractère non hydraulique) peut s'avérer nécessaire (YAKOUBI et al., 2006). Cette opération exige la réalisation d'essais complémentaires en laboratoire pour déterminer la proportion optimale à introduire dans le mélange.

V.3.1.5. Perte en poids à la cuisson

La perte en poids permet de connaître la quantité des produits susceptibles de se décomposer ou de se volatiliser au cours de la cuisson. Entre la phase du séchage et celle de la cuisson des briquettes à différentes températures, il s'est produit une diminution du poids qui est déterminée par la relation suivante (LECOMTE G., 2004 ; EL YAKOUBI N. et al., 2006):

$$\text{Perte en poids (\%)} = (m_s - m_{ct}/m_s) \times 100$$

avec m_s la masse de l'échantillon après le séchage et m_{ct} celle de l'échantillon cuit à la température t .

Les tableaux n° 72 et 73 et la figure n°100 présentent les valeurs des pertes en poids des briquettes cuites à 950, 1000, 1050, 1100 et 1150°C.

Tableau 72: Perte de poids à la cuisson des briquettes expérimentales de Kasangulu

Tmax (C°)	Briquettes	Mase crue sèche (g)	Masse cuite (g)	Perte de poids (%)	Moyenne (%)
950	Pleine 1	174,2	161,6	7,2	7,1
	Pleine 2	173,9	161,4	7,2	
	Pleine 3	174,5	162	7,1	
	Pleine 4	174,2	161,9	7	
	Pleine 5	174	161,9	7	
	Perforée 1	191,8	178,3	7,0	7,0
	Perforée 2	191,9	178,3	7,1	
1000	Pleine 6	174,6	162,6	6,8	6,8
	Pleine 7	174,4	162,5	6,8	
	Pleine 8	174,4	162,4	6,8	
	Pleine 9	174,2	162,3	6,8	
	Pleine 10	174,2	162,2	6,9	
	Perforée 3	191,4	178,5	6,7	6,7
	Perforée 4	192	179	6,7	
1050	Pleine 11	174	162	6,9	6,9
	Pleine 12	174,3	162	7,0	
	Pleine 13	174,2	162	6,9	
	Pleine 14	173,9	161,8	6,9	
	Pleine 15	173,9	161,8	6,9	
	Perforée 5	192,2	179	6,8	6,8
	Perforée 6	192	179	6,8	
1100	Pleine 26	173,6	160,9	7,3	7,3
	Pleine 27	173,4	160,7	7,3	
	Pleine 28	173,5	160,7	7,4	
	Pleine 29	173,8	161	7,3	
	Pleine 30	173,5	160,8	7,3	
	Perforée 9	192	178,3	7,1	7,1
1150	Pleine 21	174,5	161,8	7,3	7,3
	Pleine 22	174,6	161,8	7,3	
	Pleine 23	174,2	161,5	7,3	
	Pleine 24	173,9	161,2	7,3	
	Pleine 25	173,7	161	7,3	
	Perforée 8	191,8	178	7,1	7,1

Tableau 73: Perte de poids à la cuisson des briquettes expérimentales de Kingabwa

Tmax (C°)	Briquettes	Masse crue sèche (g)	Masse cuite (g)	Perte de poids (%)	Moyenne (%)
950	Pleine 1	137,6	118,6	13,8	13,8
	Pleine 2	137,5	118,5	13,8	
	Pleine 3	138,2	119	13,8	
	Pleine 4	138,3	119,2	13,8	
	Pleine 5	138	119	13,7	
	Perforée 1	153,2	132,2	13,7	13,6
	Perforée 2	153,6	132,7	13,6	
1000	Pleine 6	137,9	119,2	13,5	13,5
	Pleine 7	138	119,4	13,5	
	Pleine 8	138,8	120	13,5	
	Pleine 9	139,2	120,4	13,5	
	Pleine 10	139,5	120,6	13,5	
	Perforée 3	154,4	133,7	13,4	13,5
	Perforée 4	153,6	132,6	13,6	
1050	Pleine 11	139,2	120,2	13,6	13,7
	Pleine 12	139,4	120,3	13,7	
	Pleine 13	140,2	120,9	13,7	
	Pleine 14	139,6	120,4	13,7	
	Pleine 15	139,9	120,7	13,7	
	Perforée 5	153	132,5	13,4	13,3
	Perforée 6	153	132,8	13,2	
1100	Pleine 26	139,8	120,3	13,9	14,0
	Pleine 27	139,7	120	14,0	
	Pleine 28	139,7	120	14,0	
	Pleine 29	139,2	119,6	14,1	
	Pleine 30	139	119,5	14,0	
	Perforée 9	153,2	131,2	14,3	14,3
1150	Pleine 21	138	118,3	14,3	14,1
	Pleine 22	138,5	119	14,1	
	Pleine 23	139	119,5	14,1	
	Pleine 24	138,9	119,5	13,9	
	Pleine 25	139,5	119,9	14,0	
	Perforée 8	153	132	13,8	13,8

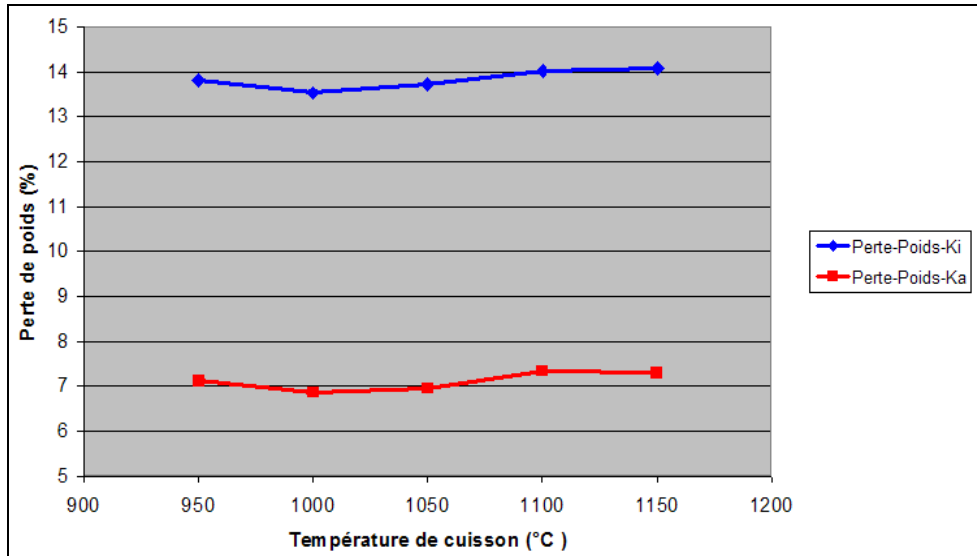


Fig. 100: Perte de poids des briquettes pleines avec la température de cuisson (Chaque point est une moyenne de cinq valeurs)

Pour les deux sites d'étude, on remarque que la perte en poids est à peu près constante et tourne autour de 7% pour les briquettes de Kasangulu de 14% pour celles de Kingabwa quels que soient la température de cuisson utilisée et le type des produits fabriqués.

Les pertes en poids à la cuisson des briquettes de Kasangulu sont tolérables, inférieures à 10%, ce qui rend les matériaux de base rentables pour une exploitation industrielle. Ces pertes en poids sont surtout liées à l'eau de constitution, à l'oxydation de FeO et éventuellement à la décomposition des nitrates de plomb. La quantité d'eau résiduelle serait plus importante dans les matériaux de Kingabwa, ce qui expliquerait des valeurs de pertes de poids supérieures à 10%.

V.3.1.6. Absorption d'eau et paramètres associés

V.3.1.6.1. But de l'essai

La plupart des terres cuites traditionnelles sont poreuses ; les briquettes expérimentales fabriquées devraient donc ainsi comporter des pores ou des vides. Ces derniers sont déterminants pour la résistance et la durabilité des briques. En effet, une faible porosité constitue le meilleur moyen de défense des briques contre les agents agressifs extérieurs.

L'absorption d'eau par immersion est le résultat des mouvements capillaires dans les pores de la brique qui sont ouverts sur le milieu ambiant. Etant une image de la porosité, l'absorption d'eau est donc utilisée comme un des indicateurs importants de la qualité de la brique.

V.3.1.6.2. Détermination

L'absorption d'eau est déterminée par immersion d'une éprouvette de brique dans l'eau jusqu'à masse constante.

Les opérations sont exécutées dans l'ordre suivant :

- immersion dans un bac à eau à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ durant un minimum de 48 heures ou jusqu'à masse humide constante. Avant la pesée au gramme près, les éprouvettes sont soigneusement essuyées avec un chiffon absorbant toute l'eau de surface ;
- séchage durant un minimum de 72 heures ou jusqu'à masse sèche constante dans une étuve ventilée dont la température est maintenue à $105 \pm 3^\circ\text{C}$.

La masse est considérée comme constante lorsque deux pesées successives à 24 heures d'intervalle ne donnent pas une différence supérieure à 0,1%.

L'absorption d'eau par immersion (Abs) est exprimée en pourcent de la masse sèche et est calculée par la relation suivante :

$$\text{Abs} = 100 \times (m_h - m_s) / m_s$$

avec : m_h , la masse humide constante de l'éprouvette après immersion ;

m_s , la masse sèche constante de l'éprouvette après séchage à l'étuve.

La porosité (n) est obtenue par la formule ci-après :

$$n (\%) = \text{Abs} \times m_s / 100$$

Conjointement avec l'exécution de l'absorption d'eau par immersion, les masses volumiques humide et sèche des éprouvettes ont été aussi déterminées selon les directives de la norme NBN EN 12390-7 :2009.

Le volume de l'éprouvette est déterminé grâce à une pesée hydrostatique. Après obtention de la masse humide constante, la masse sous eau de l'éprouvette est déterminée en suspendant le panier en toile métallique au fléau de la balance.

Le volume V de l'éprouvette est calculé par la relation suivante :

$$V = (m_h - m_w) / \rho_w$$

avec :

- m_h la masse humide de l'éprouvette après immersion et déterminée à l'air ;
- m_w la masse sous eau de l'échantillon déterminée par pesée hydrostatique ;
- ρ_w la masse volumique de l'eau considérée égale à 1000 Kg/m^3 .

Les masses volumiques humide (MVH) et sèche (MVS) sont alors calculées par les expressions ci-après :

$$MVH = m_h / V \text{ et } MVS = m_s / V$$

V.3.1.6.3. Résultats et discussions

Les tableaux n°74 et 75 présentent respectivement les pourcentages d'absorption d'eau et les masses volumiques des briquettes élaborées. Les évolutions de ces paramètres avec le temps ou avec la température de cuisson sont représentées graphiquement sur les figures n°101 et 102 alors que les corrélations MVS-Abs sont indiquées sur le graphique de figure n° 103.

Tableau 74: Absorption d'eau et porosité des briquettes expérimentales

Echantillons	Masses sèches (g)	Masses humides (g)				Absorption d'eau (%)	Porosité (%)
		24h	48h	72h	96h		
Ka 4-950	162	180,2	181,4	181,8	182	12	20
Ka 5-950	162,2	180,9	181,4	181,9	182	12	20
Ka 6-1000	162,6	181,4	181,8	182,4	182,7	12	20
Ka 8-1000	162,4	181,4	181,6	182	182,5	12	20
Ka 11-1050	162	173,9	174,5	174	174,5	8	12
Ka 12-1050	162	173,6	174	174	174	7	12
Ka 28-1100	160,6	170	170,6	171,2	171,7	7	11
Ka 29-1100	160,7	170,2	170,7	171,3	171,8	7	11
Ka 22-1150	161,7	170	170,4	171	171,6	6	10
Ka 25-1150	160,9	169	169,4	170	170,5	6	9
Ki 1-950	118,9	134,7	134,9	135	135	13	16
Ki 2-950	118,8	134,7	134,9	135	135	14	16
Ki 9-1000	120,5	135,6	135,6	135,7	135,8	12	15
Ki 10-1000	120,7	135,9	135,9	135,9	136	12	15
Ki 13-1050	121,2	129,9	123	130	130	7	9
Ki 14-1050	120,6	129,5	129,5	129,7	129,7	7	9
Ki 26-1100	120,4	127	127	127,3	127,3	6	7
Ki 27-1100	120	125,5	125,7	125,7	125,7	4	6
Ki 23-1150	119,5	123,6	123,6	123,7	123,8	3	4
Ki 24-1150	119,5	123,6	123,7	123,8	123,8	3	4

Tableau 75: Les masses volumiques humide et sèche des briquettes expérimentales

Echantillons	Masse sèche (g)	Masse humide (g)	Masse sous eau (g)	Volume (l)	MVH (Kg/m ³)	MVS (Kg/m ³)
Ka 4-950	162	182	101,3	0,081	2254,1	2008,2
Ka 5-950	162,2	182	101,3	0,081	2255,1	2009,6
Ka 6-1000	162,6	182,7	101,5	0,081	2250,7	2002,7
Ka 8-1000	162,4	182,5	101,4	0,081	2251	2003,4
Ka 11-1050	162	174,5	100,7	0,074	2366,7	2198,3
Ka 12-1050	162	174	100,6	0,073	2370,3	2207,4
Ka 28-1100	160,6	171,7	96,5	0,075	2282,4	2134,1
Ka 29-1100	160,7	171,8	96,4	0,075	2280,9	2134,1
Ka 22-1150	161,7	171,6	96,4	0,075	2281,9	2151,3
Ka 25-1150	161	170,5	95,7	0,075	2280,5	2153,1
Ki 1-950	119	135	72,9	0,062	2173,3	1913,3
Ki 2-950	118,8	135	73,5	0,062	2192,4	1928,3
Ki 9-1000	120,5	135,8	75	0,061	2236,1	1984,7
Ki 10-1000	120,7	136	75,2	0,061	2237,4	1985,5
Ki 13-1050	121,2	130	75,6	0,054	2389,4	2224,9
Ki 14-1050	120,6	129,7	75,2	0,054	2382,6	2216,5
Ki 26-1100	120,3	127,3	74,7	0,053	2419,2	2287,7
Ki 27-1100	120	125,7	74,6	0,051	2457,4	2347,9
Ki 23-1150	119,5	123,8	72	0,052	2394,5	2311,3
Ki 24-1150	119,5	123,8	71,9	0,052	2388,7	2305,8

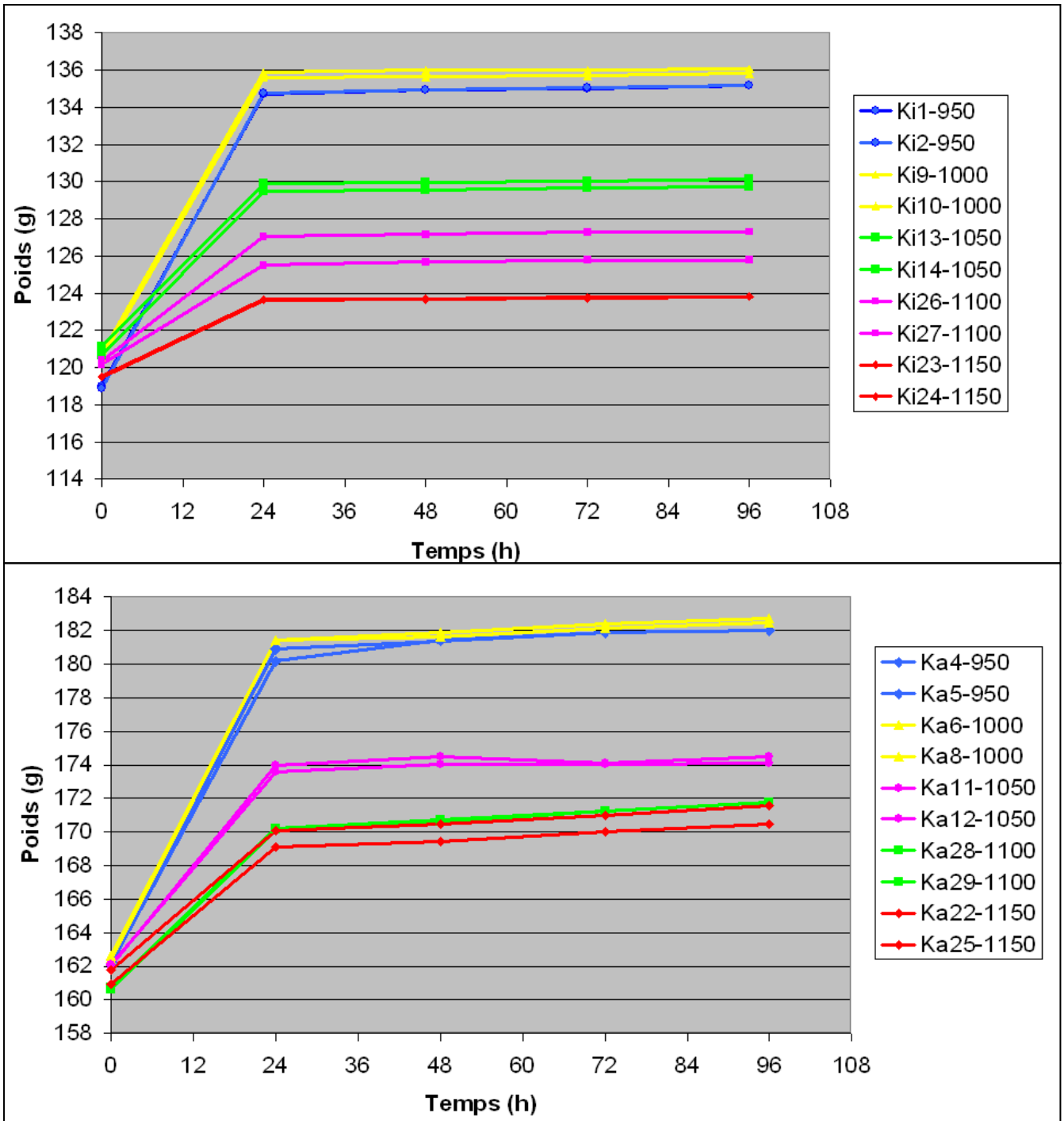


Fig. 101: Evolution de l'absorption d'eau avec le temps dans les briquettes pleines

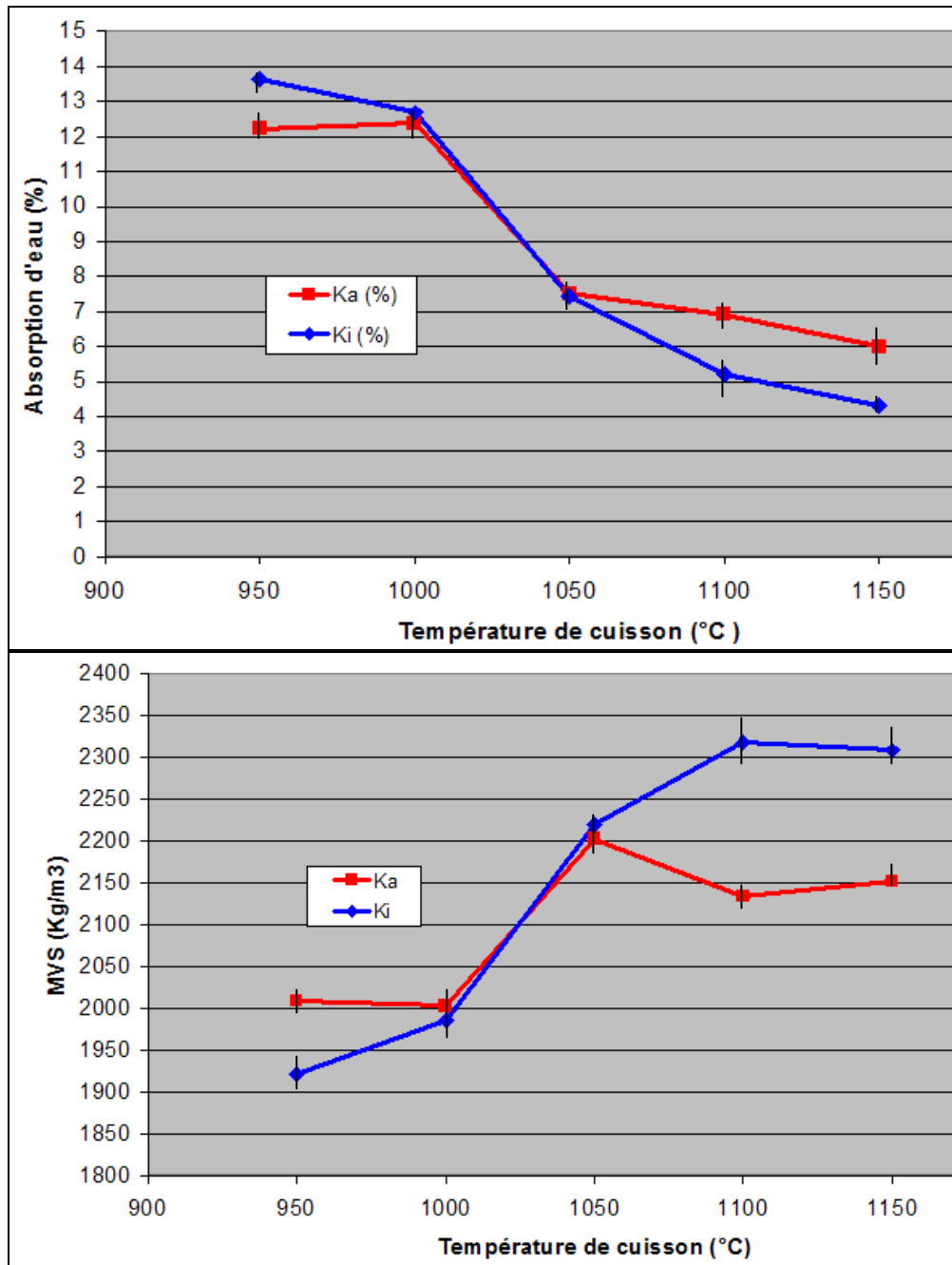


Fig. 102: Evolution de l'Abs et de la MVS avec la température de cuisson (en valeurs minimales, moyennes et maximales)

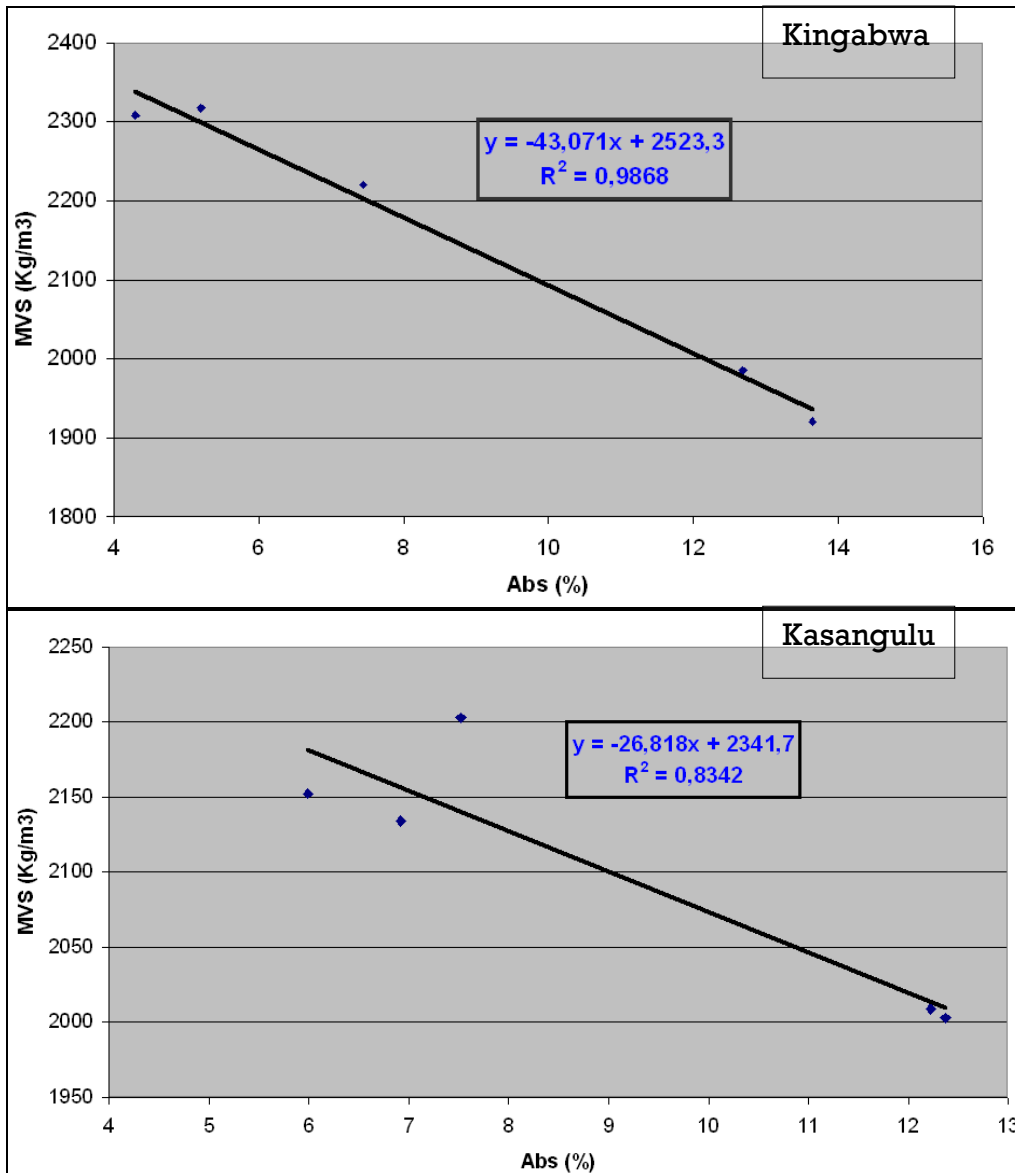


Fig. 103: Corrélation MVS-Abs des briquettes expérimentales

Quelle que soit la nature du matériau et la température de cuisson, on remarque que les briquettes élaborées présentent des courbes d'absorption d'eau similaires : elles absorbent fortement de l'eau durant les 48 premières heures d'immersion jusqu'à masse constante.

Une tendance générale à la baisse s'observe quant à l'évolution du pourcentage d'absorption d'eau par rapport à la température de cuisson. On note :

- entre 950 et 1000°C, des valeurs d'absorption d'eau supérieures à 11% ;
- de 1000 à 1150°C, une forte diminution de l'absorption d'eau en fonction de la température, diminution d'autant plus faible pour les briquettes de Kasangulu.

Dans le domaine de la briqueterie, les valeurs d'absorption d'eau comprises entre 14 et 6% obtenues sont acceptables surtout comme le problème du gel ne se pose pas à Kinshasa (éventuellement risque de gelées matinales).

Les produits de Kingabwa présentent une MVS plus importante à partir de la température de cuisson de 1050°C ; la corrélation MVS-Abs est donc très forte ($R^2=0,9868$).

V.3.1.7. Résistance mécanique

V.3.1.7.1. Matériel de détermination

Pour la réalisation de tout projet architectural ainsi que dans de nombreuses autres industries, la connaissance de la résistance mécanique des matériaux est d'une grande utilité. Elle permet entre autre de s'assurer que les ouvrages à élaborer ou à dimensionner seront fiables et qu'ils ne s'écrouleront pas, ou encore qu'ils résisteront aux contraintes environnementales auxquelles ils seront soumis.

La détermination de la résistance en flexion et compression des briquettes fabriquées est réalisée par un appareil de type Instron sous les directives respectives des normes européennes NBN EN 196-1 et EN 772-1. Composé de deux cellules (200kN et 10kN), cet appareil est contrôlé par un ordinateur comprenant un logiciel de type Merlin.

L'essai de traction par flexion trois points s'est effectué avec une cellule de charge maximale unique de 200 kN et une vitesse de déformation de 950 N/min appliquée au milieu de l'éprouvette reposant sur deux points d'appui fixes distants de 101,6mm. Chacune des moitiés de l'éprouvette est ensuite récupérée pour la détermination de la résistance à la compression (Fig.104).



Fig. 104: Dispositif de mesure de la flexion et de la compression des briquettes

Le tableau n°76 est donné à titre de guide pour le choix de la vitesse appropriée pour l'application de la charge maximale utilisée (Norme EN 772-1).

Tableau 76: Vitesse d'application de la charge

Résistance à la compression prévue (N/mm ²)	Taux d'augmentation de la charge (N/mm ²)/s
<10	0,05
11 – 20	0,15
21 – 40	0,3
41- 80	0,6
>80	1,0

Les conditions du local de réalisation de ces essais sont :

- humidité : 46-50% ;
- température : 23-26°C.

V.3.1.7.2. Résultats et discussions

Les résultats des essais de la résistance mécanique en flexion et en compression de différentes briquettes expérimentales (Ki : Kingabwa ; Ka : Kasangulu) sont consignés dans les tableaux n°77 et 78 et repris graphiquement sur la figure n°105.

Tableau 77: Résistance mécanique à la flexion des briquettes expérimentales

Briquettes	Masse (g)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Longueur (mm)	Charge max (N)	Contrainte maximale (N/mm ²)
Ki 950-4	119,6	35,6	17,2	131,8	365	5,3
Ki 950-5	119,5	35,5	17,5	131,8	446	6,2
Ki 1000-7	119,5	35,8	17,7	131,6	357	4,8
Ki 1000-8	120,1	36,2	17,8	132	425	5,6
Ki 1050-11	120,5	35,3	17,2	130,6	426	6,2
Ki 1050-12	120,6	35,6	17,5	131	401	5,6
Ki 1100-28	120,2	32,5	15,3	122,8	546	10,9
Ki 1100-29	119,7	32,5	15,2	122,5	536	10,9
Ki 1150-22	119	30,9	14,4	118,9	768	18,3
Ki 1150-25	119,9	31,9	15,0	119,1	881	18,7
Ka 950-2	161,8	38,1	20,1	137,7	251	2,5
Ka 1000-9	162,3	37,8	20,5	137,9	210	2,0
Ka 1000-10	162,3	38,1	19,9	137,4	203	2,0
Ka 1050-14	161,9	37,8	19,6	136,9	382	4,0
Ka 1050-15	161,9	37,6	19,7	137,7	375	3,9
Ka 1100-27	160,6	36,7	18,5	132,3	464	5,6
Ka 1100-30	160,5	36,3	18,7	132	485	5,8
Ka 1150-21	161,7	36,5	18,9	131,9	489	5,7
Ka 1150-23	161,4	36,5	18,9	131,9	487	5,6

Tableau 78: Résistance mécanique à la compression des briquettes expérimentales

Briquettes	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur (mm)	Charge maximale (kN)	Contrainte maximale (N/mm ²)
Ki 950-4	35,6	40	17,2	53,5	37,5
Ki 950-5	35,5	40	17,5	71,1	50,1
Ki 1000-7	35,8	40	17,7	52,7	36,8
Ki 1000-8	36,2	40	17,8	75,8	52,3
Ki 1050-11	35,3	40	17,2	49,5	35
Ki 1050-12	35,6	40	17,5	61,4	43,1
Ki 1100-28	32,5	40	15,3	58,1	44,6
Ki 1100-29	32,5	40	15,2	69,9	53,8
Ki 1150-22	30,9	40	14,4	3,8	Matériel cassant
Ki 1150-22.1	31,9	40	14,4	3,6	Matériel cassant
Ki 1150-25	30,9	40	15	2	Matériel cassant
Ka 950-1	37,8	40	20,2	39	25,8
Ka 950-1.2	37,8	40	20,2	41,4	27,4
Ka 950-2.1	38,1	40	20,1	39,8	26,2
Ka 1000-9	37,8	40	20,5	39,5	26,1
Ka 1000-10	38,1	40	19,9	39,1	25,6
Ka 1050-14	37,8	40	19,6	49,4	32,7
Ka 1050-15	37,6	40	19,7	48	31,9
Ka 1100-27	36,7	40	18,5	25,9	17,6
Ka 1100-27.2	36,7	40	18,5	26,7	18,2
Ka 1100-30	36,3	40	18,7	26,2	18
Ka 1150-21	36,5	40	18,9	25,6	17,6
Ka 1150-23	36,5	40	18,9	24,1	16,5

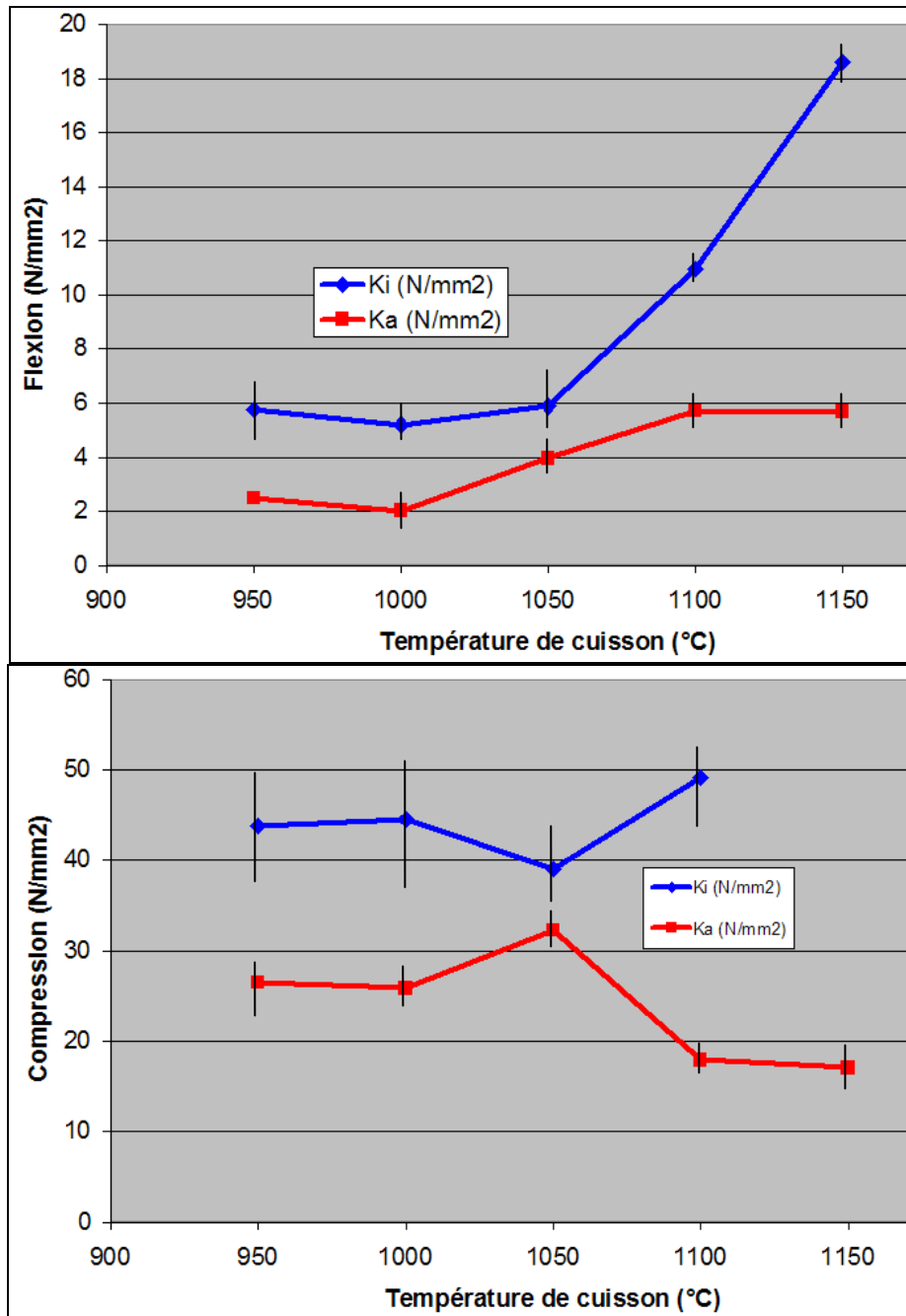


Fig. 105: Evolution de la résistance mécanique avec la température de cuisson (en valeurs minimales, moyennes et maximales)

La résistance mécanique à la flexion montre une fonction croissante avec la température de cuisson. L'augmentation de ce paramètre est plus prononcée à partir de la température de cuisson de 1050°C pour les briquettes de Kingabwa. En compression, la résistance de ces dernières augmente jusqu'à un certain point (1150°C) où elle est trop élevée et la briquette devient cassante. Pour ces matériaux, la température de 1100°C représente cette limite à la résistance mécanique à la compression.

Les briquettes de Kasangulu montrent de contraintes à la compression dont les valeurs maximales (31,9-32,7N/mm²) sont situées à 1050°C et les plus faibles (17-18N/mm²) à des températures de cuisson les plus importantes (1100 et 1150°C). Ces valeurs sont bonnes pour un emploi dans la filière briquetière de la céramique (TRAORE K. et al., 2007).

La forte diminution de la résistance mécanique en compression observée à partir de la température de cuisson de 1050°C permet de formuler l'hypothèse de la distribution et de la nature de principales phases cristallines présentes dans le squelette du matériau cuit. La validation d'une telle hypothèse peut se faire par l'intégration des caractéristiques technologiques à l'étude minéralogique, texturale et/ou microstructurale au MEB.

La résistance mécanique des matériaux de Kingabwa est très forte à partir de 1050°C (6-18N/mm² à la flexion et >35N/mm² à la compression), ce qui est un facteur favorable pour l'incorporation de ces argiles dans le domaine de la fabrication des produits sanitaires et même des carreaux de revêtement des sols (LIGAS P. et al., 1997 ; MAMBA MPELLE, 1997 ; MINERA SABATER, 2003).

Les valeurs de contraintes maximales en compression des briquettes expérimentales cuites sont comparables ou proches de celles développées par les bétons ordinaires (30-50MPa) ; à la flexion, certaines (Kingabwa) en sont mêmes supérieures.

Par contre, elles sont de loin supérieures aux contraintes (compression) développées par les briques de fabrication artisanale échantillonnées sur le terrain et dont les moyennes des résultats de cinq briques par type sont présentées dans le tableau n°79.

Tableau 79: Résistance mécanique à la compression des briques artisanales de Kasangulu

Type de briques	Dimensions (cm)	Poids (Kg)	Contrainte maximale (N/mm ²)
Cruces	29,8-10,9-14,6	6,82	0,3
Cuites	31-10,5-14,8	7,26	1,8
Cuites et stabilisées au ciment	30-9,6-15,2	6,82	1,7

Les briques fabriquées par les artisans de Kasangulu sont, du point de vue résistance et esthétique (dimensions), hors normes internationales en matière de construction. La mauvaise cuisson (l'incuisson) et le dosage irrégulier des matériaux de base sont à l'origine de ces défauts (DOUDI M. et al., 1999).

Pour obtenir des briques et même des tuiles de bonne qualité à partir de matériaux de Kasangulu, il est indispensable de les cuire à des températures de l'ordre de

1050°C en vue d'éviter de taux d'absorption d'eau supérieurs à 10% qui favorisent l'obtention des produits moins densifiant ($MVS < 2,2 \text{ Kg/m}^3$). Cette température de cuisson de 1050°C n'engendre que de faibles retraits de l'ordre de 1%. La bonne maîtrise de l'uniformité des dimensions des produits finis est donc étroitement liée à ce paramètre thermique (Fig.106).

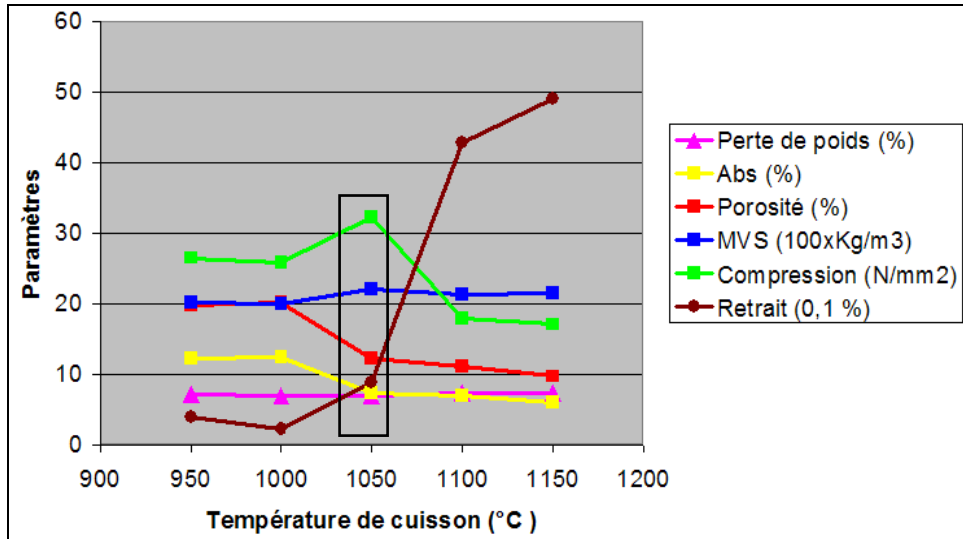


Fig. 106: Détermination de la température idéale de cuisson

V.3.2. Produits stabilisés

De coloration rouge brunâtre, les briquettes stabilisées au ciment présentent les caractéristiques ci-après (Tabl.80).

Tableau 80: Caractéristiques des briquettes stabilisées au ciment

N° échantillon	Dimensions (mm)	Poids (gr)	Résistance mécanique à la compression (MPa)
1	10x4,5x2	180,2	13,9
2	10x4,5x2,1	180,8	15,5
3	9,8x4,6x2	179,5	14,8
4	10x4,2x2,1	178,7	14,4
5	9,7x4,3x2,2	180,4	14,7
6	10,1x4,4x2,1	181,5	15,4
7	9,9x4,5x2,3	178,9	15,2
8	10,1x4,3x2,1	179,8	14,2
Moyenne			14,8

V.4. Caractéristiques minéralogiques et granulométriques

V.4.1. Techniques

V.4.1.1. Diffraction des rayons X

Les briquettes expérimentales cuites à 950, 1000, 1050, 1100 et 1150°C sont passées au broyeur à mortier (en agate) pour l'obtention de la poudre fine de granulométrie inférieure à 150µm. Les différentes poudres sont ensuite soumises à un rayonnement X balayant un angle de 2° à 45° 2θ pendant 20 minutes en vue d'identifier et de semi-quantifier les phases minéralogiques totales. Le diffractomètre Bruker D8 Advance (anticathode CuK_α: λ = 1,5418Å) de l'Unité de Recherches en Argile et Paléoclimat du Département de Géologie de l'Université de Liège, a été utilisé. Le facteur correctif de plagioclases a été utilisé pour l'estimation semi-quantitative de la mullite à cause de la similitude des structures cristallines de ces minéraux.

V.4.1.2. Microscopie Electronique à Balayage (MEB)

Les observations de différentes phases constitutives des briquettes cuites ont été faites au Centre Commun de Microscopie Electronique de l'Université de Liège à l'aide d'un appareil de marque Philips XL-30 équipé d'un spectromètre en dispersion d'énergie (EDS). L'appareil « BALZERS SCD-030 » a été utilisé pour métalliser les échantillons au platine (20nm d'épaisseur) dans un évaporateur à plasma (3cm, 30mA pendant 120 secondes). Ces échantillons métallisés sont observés au MEB en mode « électrons secondaires » pour déterminer les caractéristiques texturales et procéder à quelques identifications ponctuelles.

D'autres échantillons de briquettes ont été découpés avec une scie diamantée dans un appareil Accustom-5 de marque Struers en utilisant l'eau comme lubrifiant puis stabilisés dans la résine de type Epofix. Ils sont observés au MEB en mode « électrons rétrodiffusés (BSE) » en vue d'étudier la morphologie des phases en présence, de quantifier et de cartographier les éléments chimiques constituant les minéraux des briquettes cuites.

Certaines lames minces ont été aussi confectionnées en polissant des surfaces à l'aide des papiers de polissage « silicium carbure » dans une unité Rotopol-2 de la polisseuse de type Struers avec des vitesses de rotation de 150 ou 300 rpm pour être observées au microscope optique Olympus BX 60 en lumière transmise ou réfléchie.

V.4.1.3. Granulométrie

Les potentialités du granulomorphomètre Occhio 500 nano ont été investiguées pour l'analyse de particules composant les briquettes expérimentales selon le principe déjà exposé au point IV.2.4.4.1.

V.4.2. Résultats et discussions

Les spectres des échantillons de briquettes expérimentales de deux sites pilotes sont représentés graphiquement (en unités arbitraires en ordonnées) sur la figure n°107.

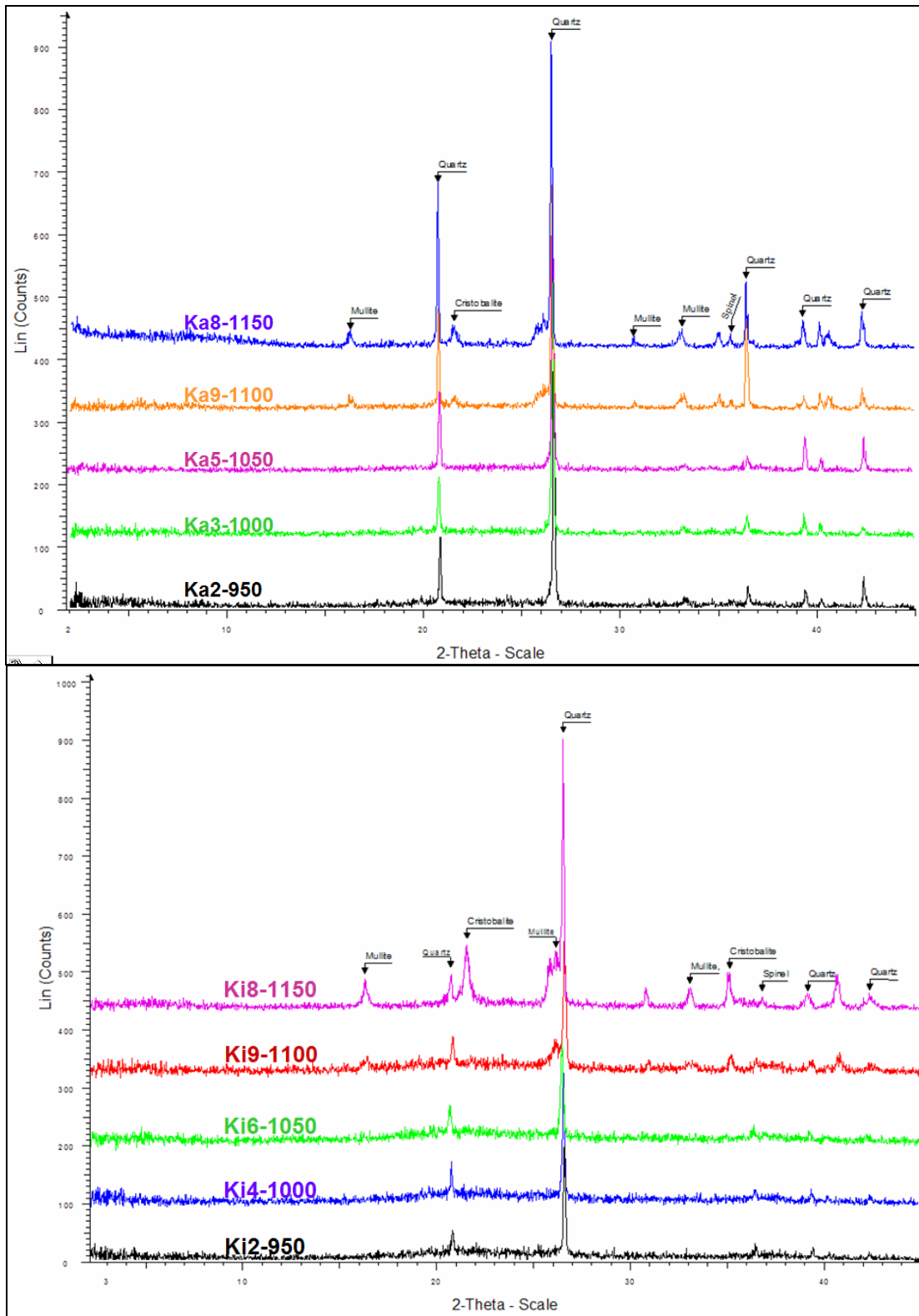


Fig. 107: Les spectres rayons X des briquettes expérimentales

Selon les températures de cuisson utilisées, quatre principales phases minéralogiques ont été identifiées. Il s'agit du quartz, de la spinelle, de la mullite et de la cristobalite (Fig.108 ; Tabl. 81).

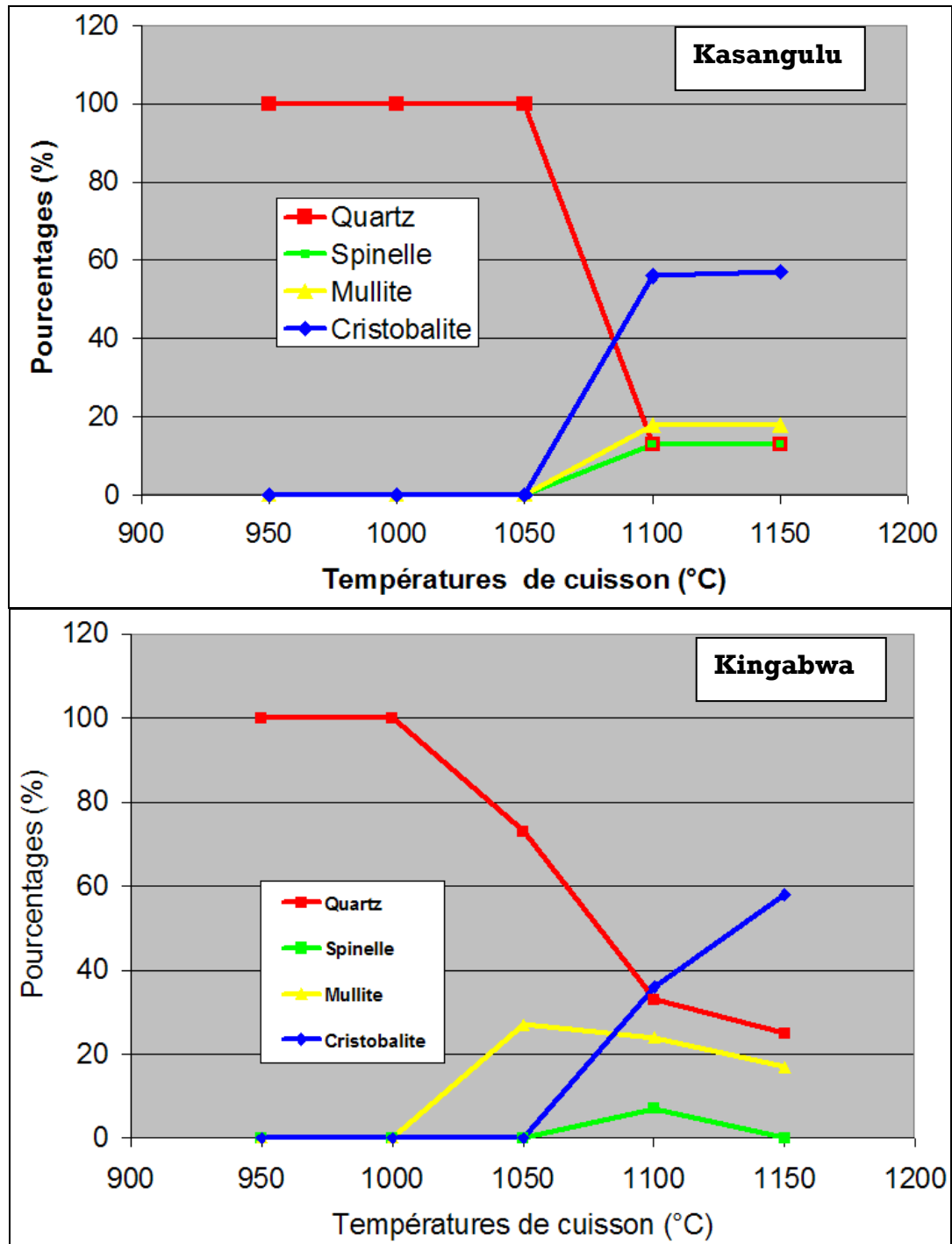


Fig. 108: Les minéraux des briquettes expérimentales

Tableau 81: Composition minéralogique des briquettes cuites

Sites	Echantillons	Retrait à la cuisson (%)	Minéraux	Résistance mécanique moyenne (N/mm ²)	
				Flexion	Compression
Kingabwa	Ki950	2,7	Quartz (100%)	5,7	43,8
	Ki1000	2,7	Quartz (100%)	5,2	44,5
	Ki1050	3,7	Quartz (73%) Mullite (27%)	5,8	39,1
	Ki1100	9,5	Quartz (33%) Spinelle (7%) Mullite (24%) Cristobalite (36%)	10,9	49,2
	Ki1150	12,3	Quartz (25%) Mullite (17%) Cristobalite (58%)	18,6	? (Matériel cassant)
Kasangulu	Ka950	0,4	Quartz (100%)	2,5	26,5
	Ka1000	0,2	Quartz (100%)	2,0	25,8
	Ka1050	0,9	Quartz (100%)	3,9	32,3
	Ka1100	4,3	Quartz (13%) Spinelle (13%) Mullite (18%) Cristobalite (56%)	5,7	17,9
	Ka1150	4,9	Quartz (13%) Spinelle (13%) Mullite (17%) Cristobalite (57%)	5,7	17,1

Les températures de formation de ces minéraux sont conformes avec celles données dans la littérature (JOUENNE C.A., 1984 ; PILIPCHTIN L.D., 2000 ; KARFA T. et al., 2001 ; HAJJAJI M. et al., 2002 ; ELIMBI A., 2004 ; LECOMTE G., 2004 ; LECOMTE G. et al., 2004 ; MONTEIRO S.N. et VEIRA C.M.F., 2004).

Les briquettes de Kasangulu sont caractérisées par :

- une composition minéralogique dominée totalement par le quartz jusqu'à la température de cuisson de 1050°C ;
- une diminution brutale de la teneur en quartz de 100% (à 1050°C) à 13% (à 1100-1150°C) ;
- l'existence de 13% de spinelle jusqu'à la température de cuisson de 1150°C.

Quant aux échantillons des briquettes cuites de Kingabwa, il y a lieu de noter que :

- la diminution du pourcentage en quartz est progressive jusqu'à 25% à 1150°C ;
- la mullite est formée à 1050°C alors que la spinelle à 1100°C pour disparaître à 1150°C de cuisson.

Dans les deux cas, la diminution du pourcentage en quartz est concomitante à l'augmentation de la teneur en cristobalite.

Au cours du chauffage jusqu'à 1150°C de matériaux céramiques de Kasangulu et de Kingabwa étudiés, une mullitisation est observée respectivement à partir de 1050°C et 1100°C. Les mécanismes responsables de ce phénomène de formation de la mullite au sein de ces matériaux peuvent se traduire de la manière suivante :

1°) $950^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1050^{\circ}\text{C}$

- Déshydroxylation et disparition totale de la kaolinite ;
- Apparition de la métakaolinite qui par démixtion produit de domaines amorphes riche en Si et/ou en Al ;
- Quartz.

2°) $1050^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1150^{\circ}\text{C}$

Issue de la transformation partielle ou totale de la spinelle pendant cette tranche de température, la mullite, de même que le quartz, ont engendré la cristobalite.

La résistance mécanique à la compression n'est pas uniquement fonction de la simple quantité de ces phases minéralogiques rigides. Lors des transformations minéralogiques à l'état solide, des flux visqueux ont dû se former. L'interconnexion et l'organisation texturale de ces phases rigides au sein de cette masse visqueuse peuvent justifier la baisse sensible de la résistance mécanique à la compression de briquettes expérimentales de Kasangulu.

Les images MEB et les spectres EDS associés ainsi que la répartition de différents éléments composants les échantillons de briquettes de Kasangulu cuites à 1150°C sont présentées dans les figures n° 109 à 113.

La figure n° 114 donne la composition minéralogique de ces briquettes observées au microscope optique en lumière transmise et réfléchie.

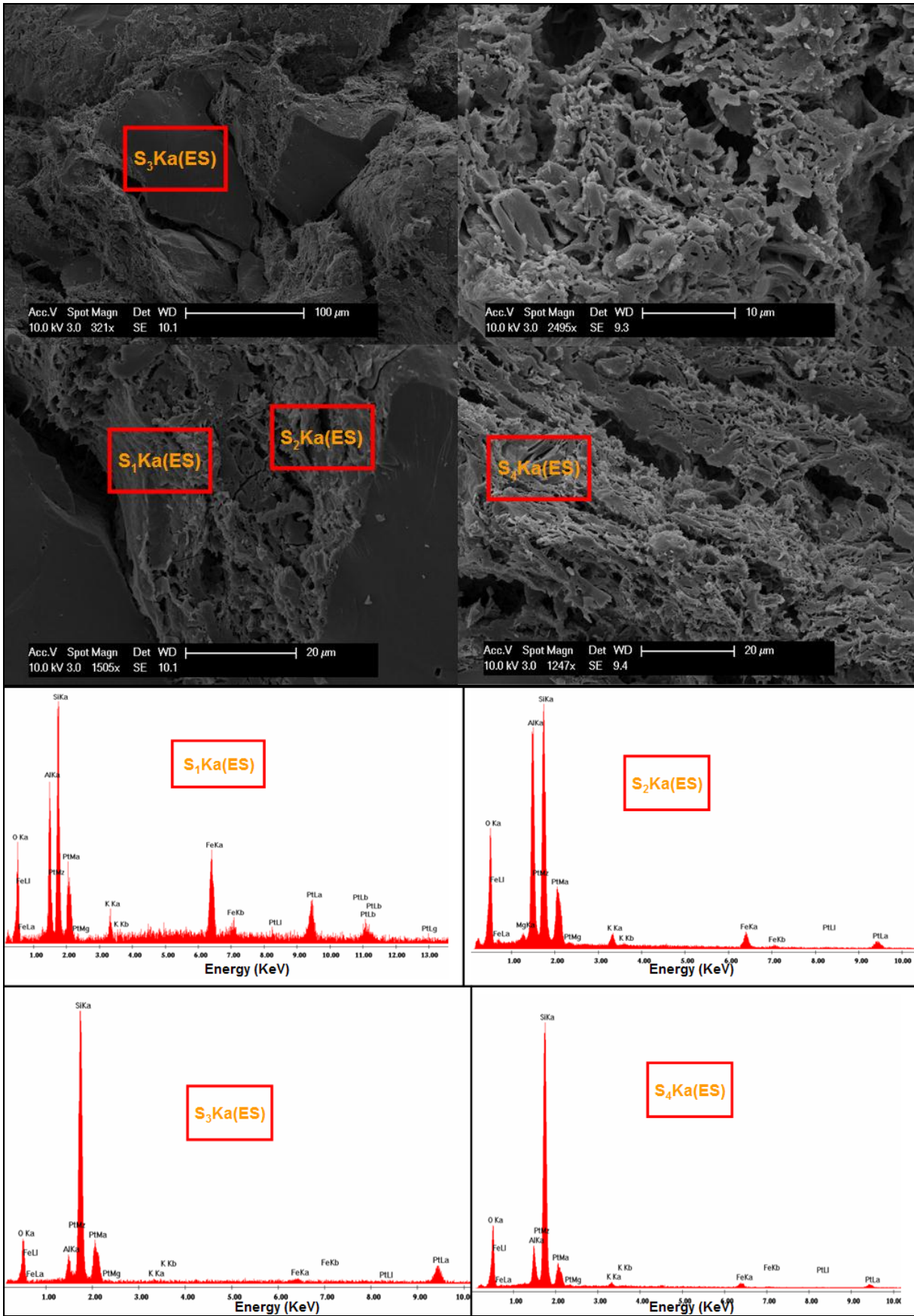


Fig. 109: Microphotographies de MEB (Electrons secondaires) et spectres associés de 1150Ka

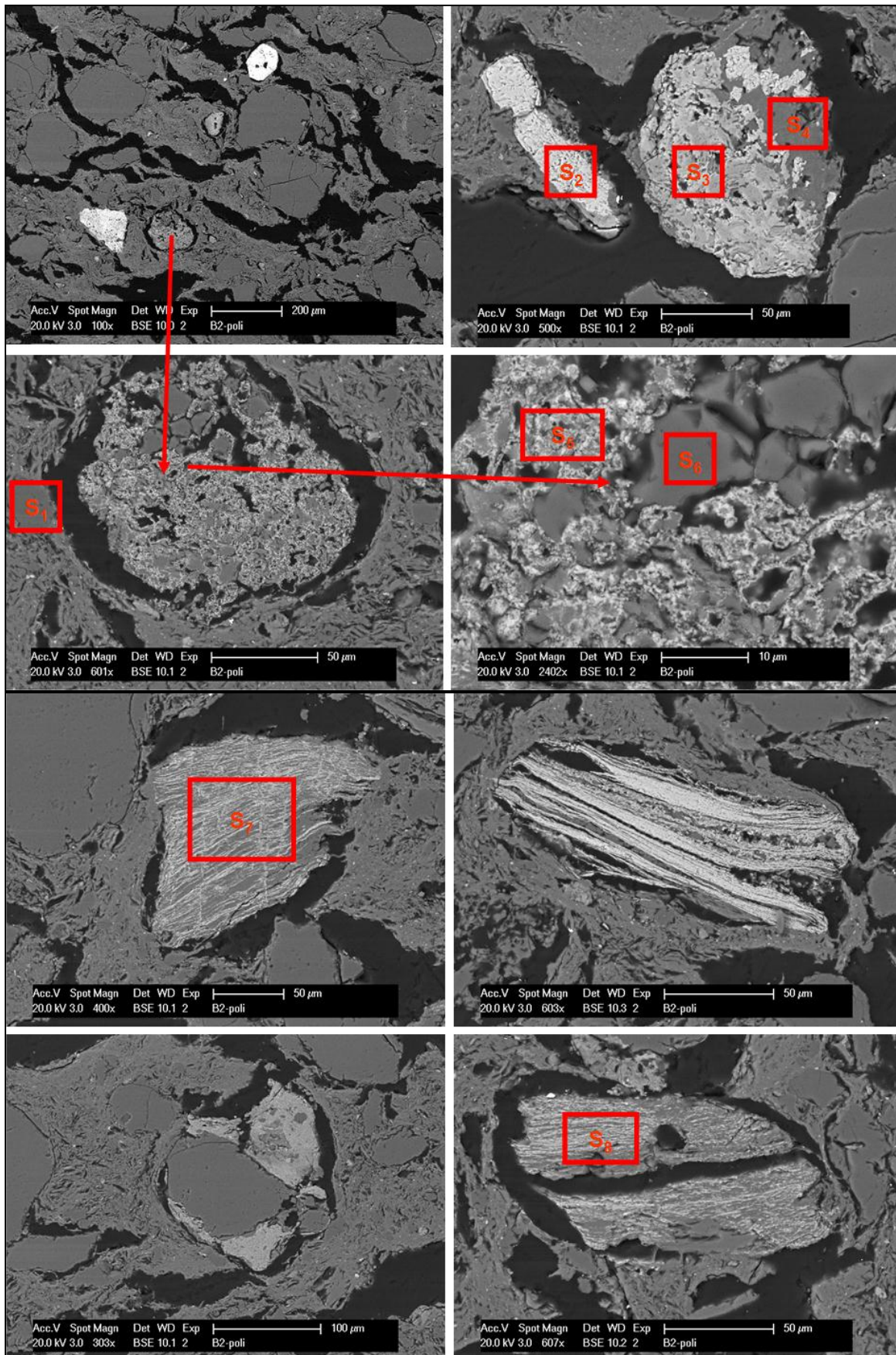


Fig. 110: Textures des minéraux 1150Ka

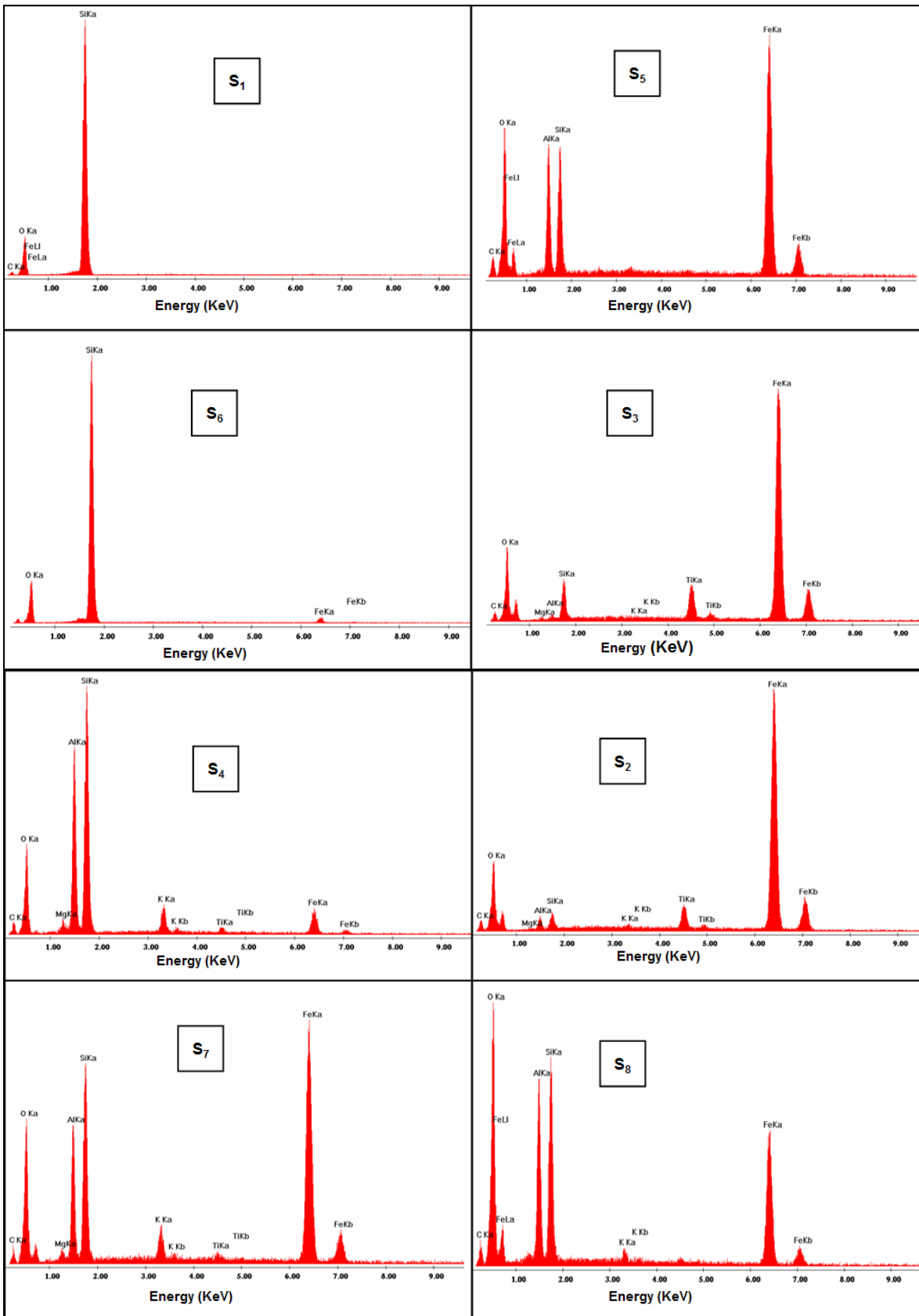


Fig. 111: Spectres EDS associés aux textures des minéraux 1150Ka

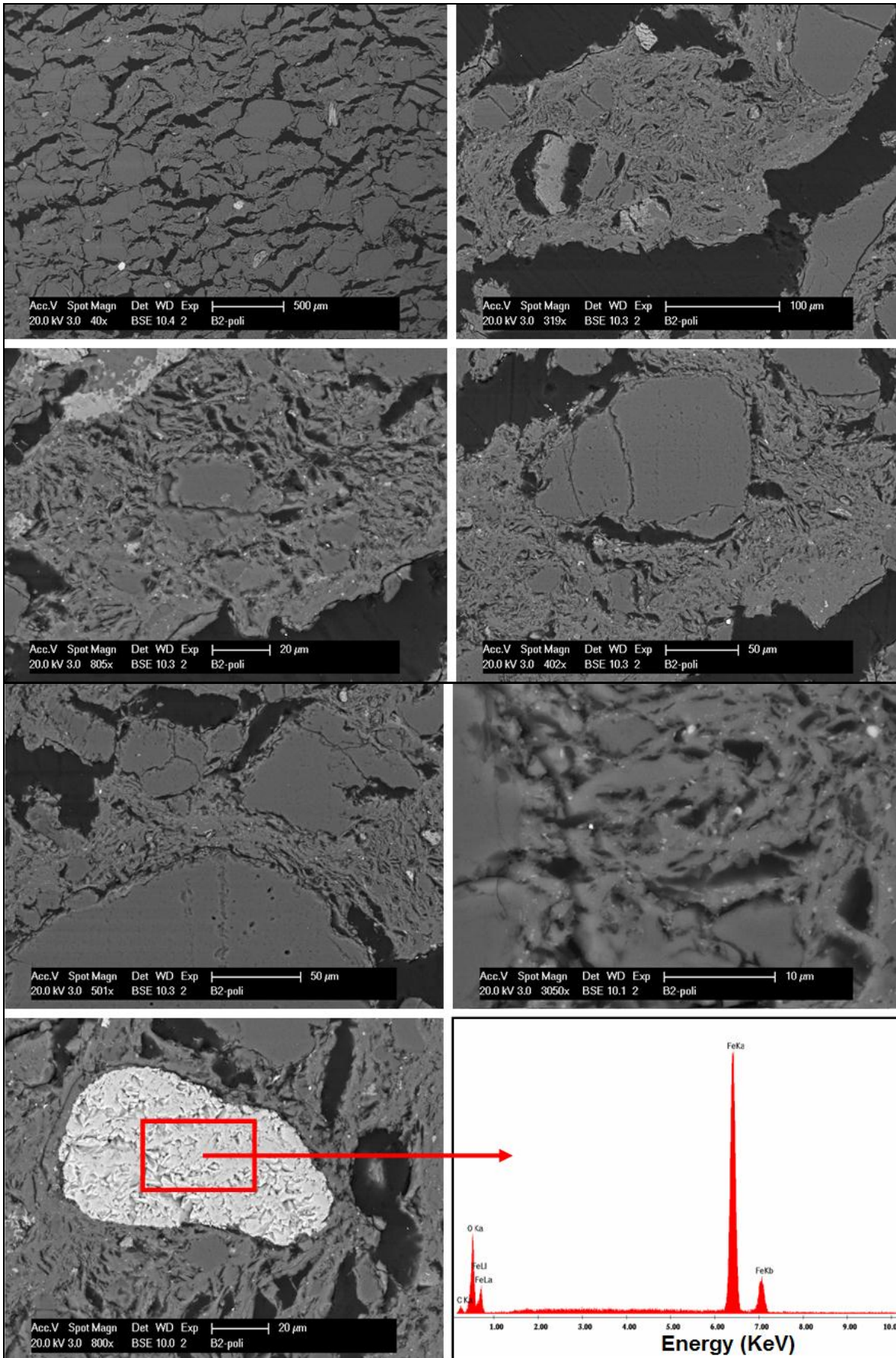


Fig. 112: Fissuration de la pâte 1150Ka

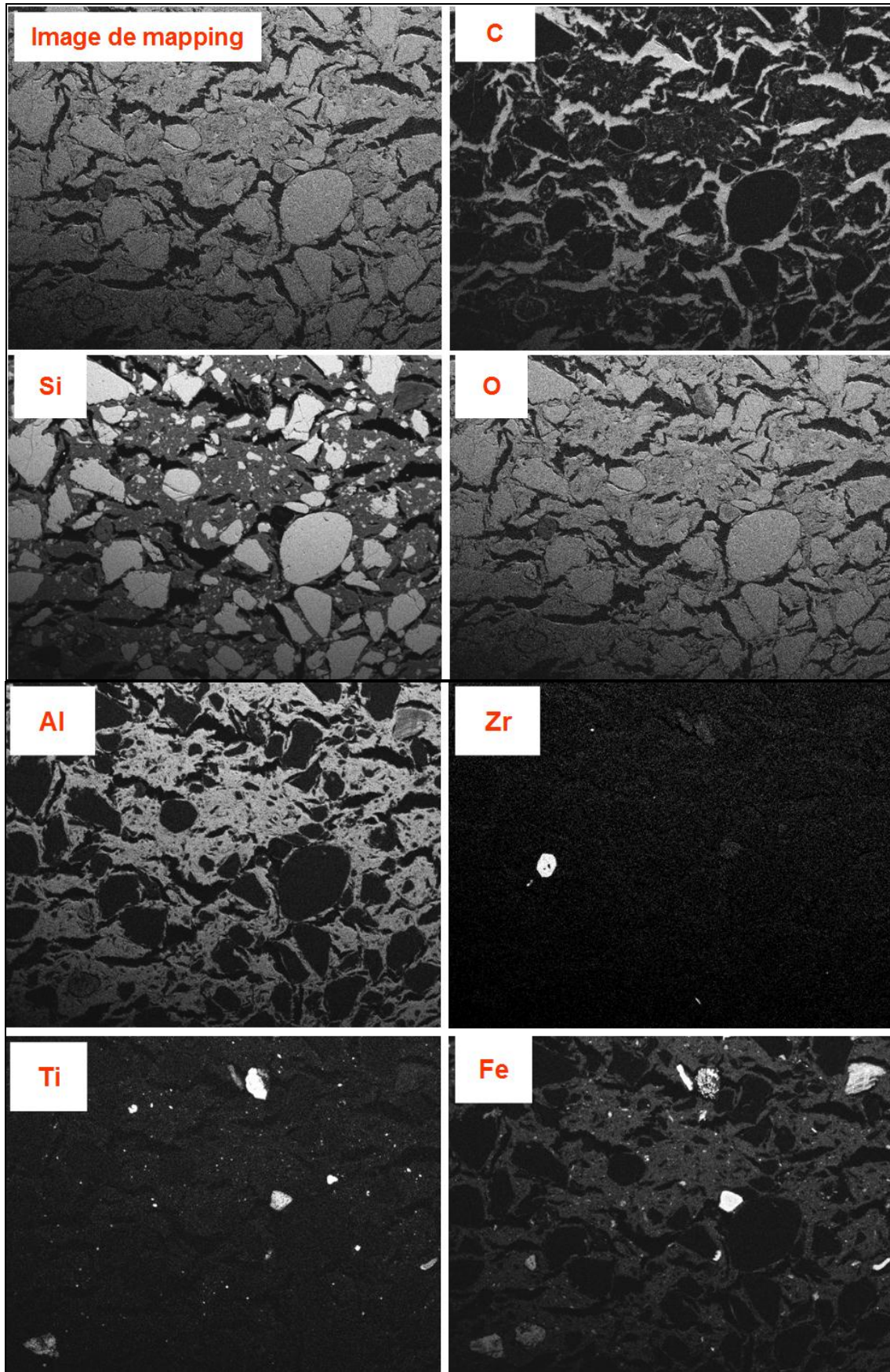


Fig. 113: Mapping des éléments constitutifs de 1150Ka

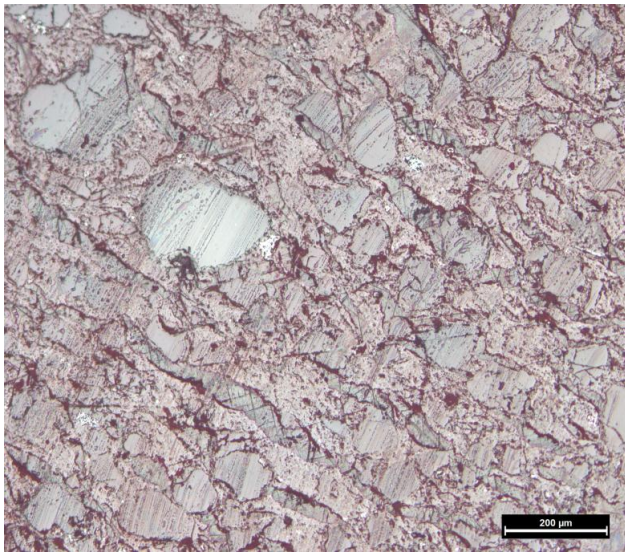
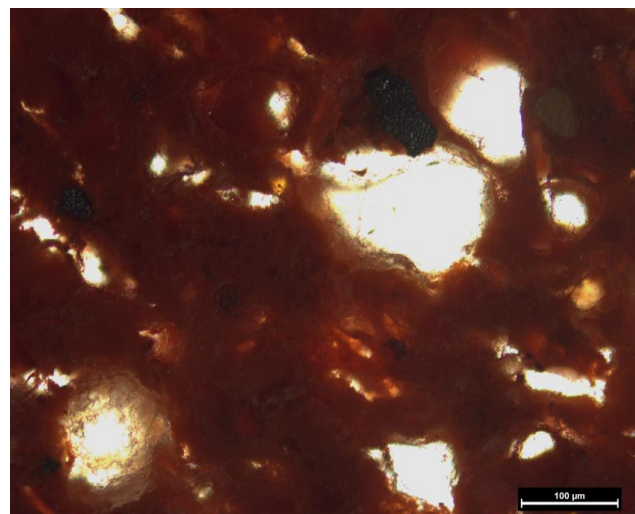
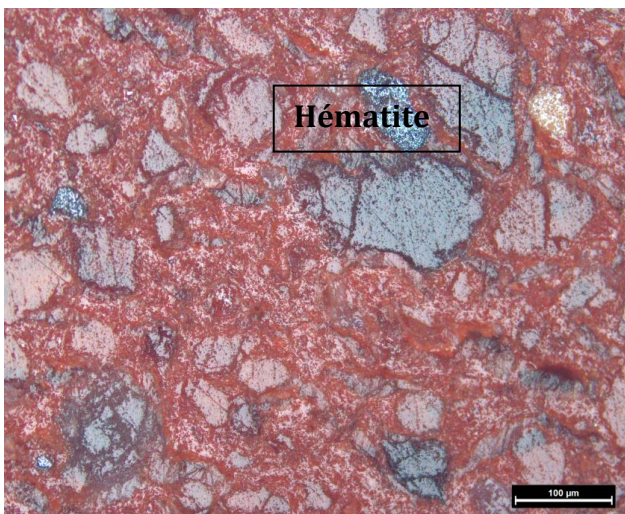
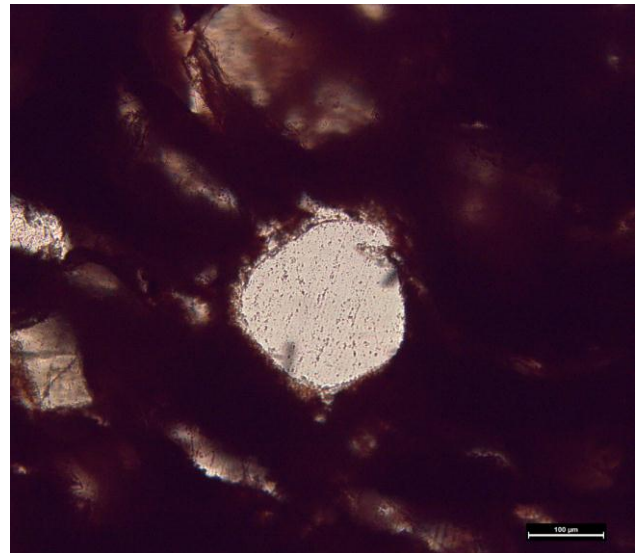
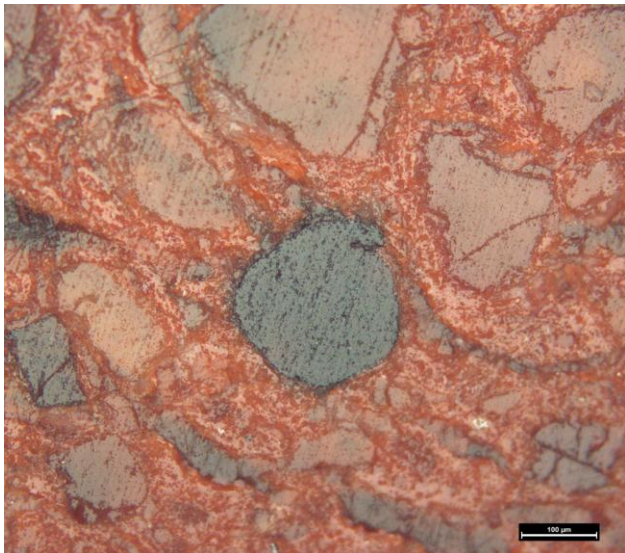
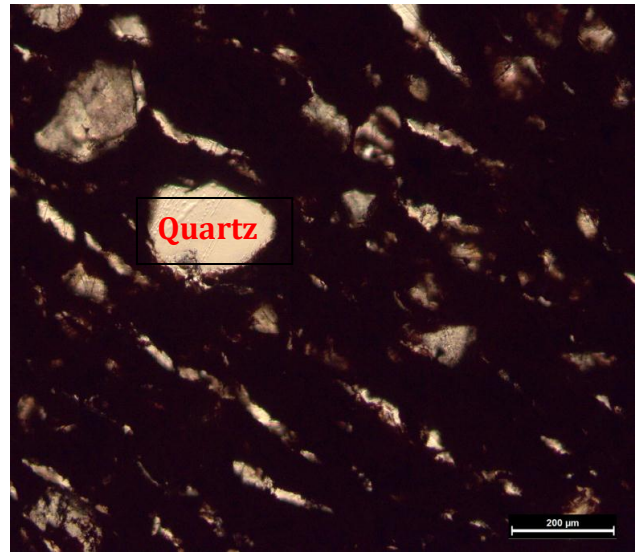
Lumière réfléchie*Lumière transmise*

Fig. 114: Photos des lames minces-1150Ka prises au microscope optique

Les cristaux des briquettes de Kasangulu cuites à 1150°C sont, soit arrondis, soit anguleux. Ce sont essentiellement les minéraux de la silice (quartz et cristobalite) et les oxydes d'aluminosilicates (mullite) accompagnés en plus faibles quantités et comme impuretés des oxydes métalliques tels que l'anatase (TiO₂) et l'hématite (Fe₂O₃) non identifiés en diffraction des rayons X.

Les nombreuses fissures quasi linéaires sont associées à des fissures en cercles concentriques qui laissent penser à des vacuoles et qui isolent les cristaux de la pâte dans laquelle ils baignent sans une grande cohésion.

La pâte n'adhère pas partout à la surface des cristaux ; elle présente plusieurs trous sous forme de microbulles (de quelques microns comme dans une mousse) et des microfissures qui rendent la briquette friable. Chimiquement, cette pâte est tantôt riche en oxygène, aluminium et silicium, tantôt riche en fer et titane.

Ces observations montrent que, vers la température de cuisson de 1100°C, le flux visqueux (silice alumineuse mouillante), combiné aux impuretés présentes, s'est introduit, suite à la forte diminution de la teneur en quartz (très réactif à ces températures), dans les interstices ou zones de faiblesses (espaces interfeuilletés par exemple) et a provoqué une contraction de la masse. Les fissures circulaires et linéaires qui séparent les cristaux empilés en feuillets en deux morceaux (Fig.110) montrent que le matériau avant cette température était compact. Les preuves des zones de réaction via fissures développées sont aussi observables autour des cristaux de cette figure n° 110. On assiste là à un certain degré de frittage et de solution solide, ainsi qu'à des réactions eutectiques au niveau de la jonction entre les grains minéraux et les phases de fusion.

La diminution de la résistance mécanique à la compression de 32,30N/mm² (1050°C) à 17,9N/mm² (1100°C) puis à 17,1N/mm² (1150°C) est donc fortement liée à :

- l'existence de plusieurs fissures notamment celles en cercles concentriques qui isolent les cristaux de la pâte ; ces fissures sont le résultat de la réaction de la silice à haute température ($\pm 1100^\circ\text{C}$) avec les impuretés d'oxyde de fer et de titane qui se trouvent en faibles concentrations ;
- l'existence d'une pâte microfissurée, à nombreux microtrous (microbulles) qui dégradent sérieusement ses propriétés de liant (pâte insuffisamment cohérente et compacte) ;
- la présence de grains de quartz anguleux et des craquelures qui sont susceptibles de générer de porosité et des contraintes affaiblissant la résistance mécanique (KAMSEU E. et al., 2007).

Compte tenu des conditions thermodynamiques très contraignantes pour que le quartz se transforme en tridymite, le quartz des échantillons de briquettes de

Kasangulu s'est transformé en cristobalite à des températures de l'ordre de 1050°C. En effet, à cette température le matériau ayant perdu toutes ses propriétés plastiques, les transformations de cristobalite α en cristobalite β auraient créé des champs de contraintes qui ont influencé les propriétés mécaniques de briquettes étudiées. On se trouve donc dans le domaine métastable de la cristobalite.

Les images MEB prises sur la briquette de Kasangulu cuite à 1050°C montrent une composition minéralogique semblable à celle des briquettes de ce même site mais cuites à 1100°C et 1150°C (Fig.115 à 118). Néanmoins, il y a lieu de noter que les fissures y sont peu nombreuses et surtout au contact des grains minéraux. Mais, des fissures qui se sont développées au contact d'un cristal de la silice (quartz) seraient à la base de l'inclusion solide de l'anatase (TiO_2) dans ce quartz (Fig.115).

La pâte, compacte, présente peu de microtrous et de microfissures. Elle cimente bien des grains minéraux qui s'y trouvent. Même à plus fort grossissement (Fig.106), on observe de cristaux et plusieurs paillettes de microcristaux qui adhèrent très bien dans cette pâte. Ceci justifie le fait que la résistance mécanique des briquettes cuites à 1050°C est supérieure (presque le double) à celle des briquettes cuites à 1100°C et 1150°C.

La microscopie optique présente de textures similaires à celles vues au MEB (Fig. 119).

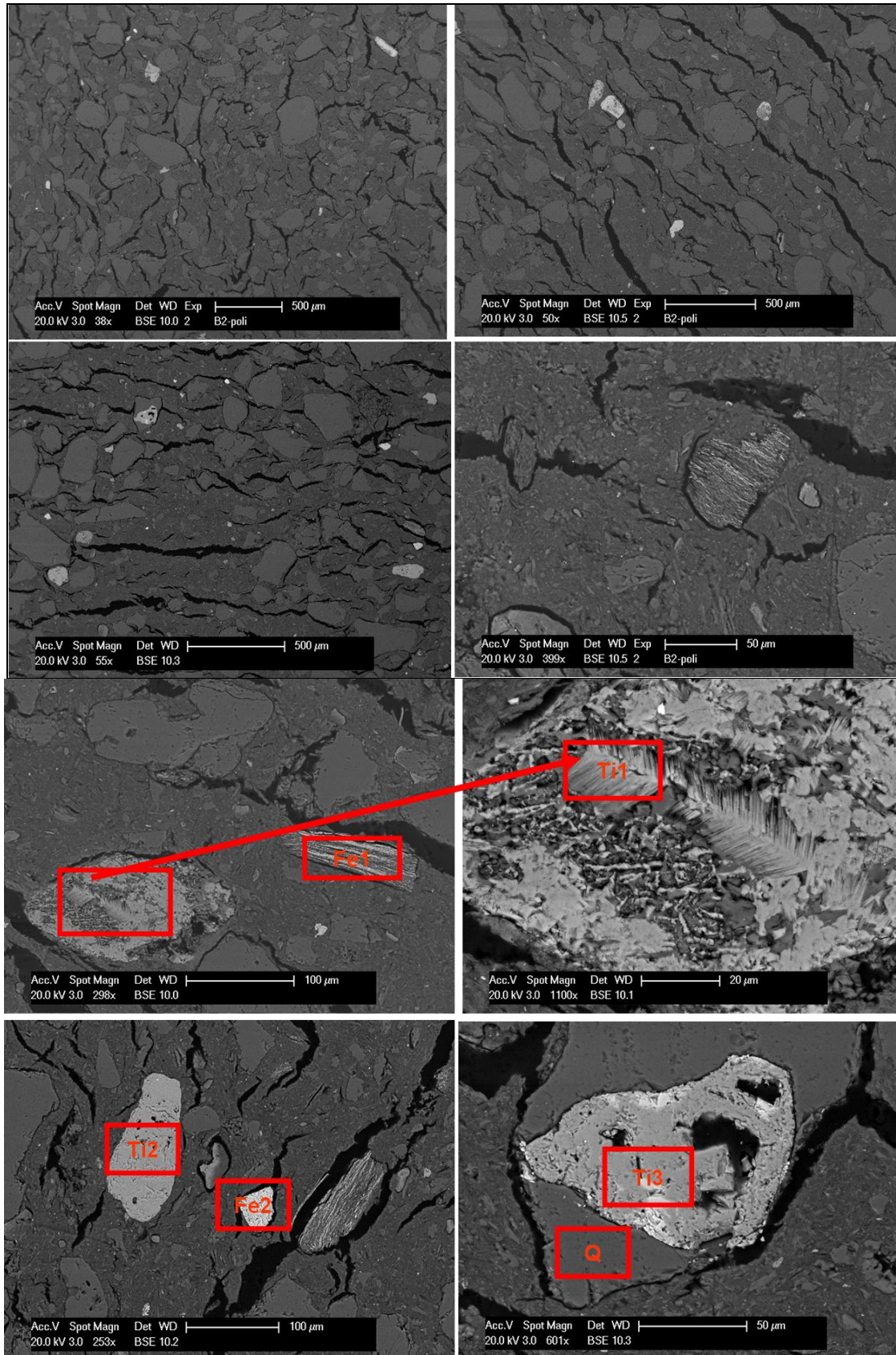


Fig. 115: Vue globale et textures des minéraux 1050Ka

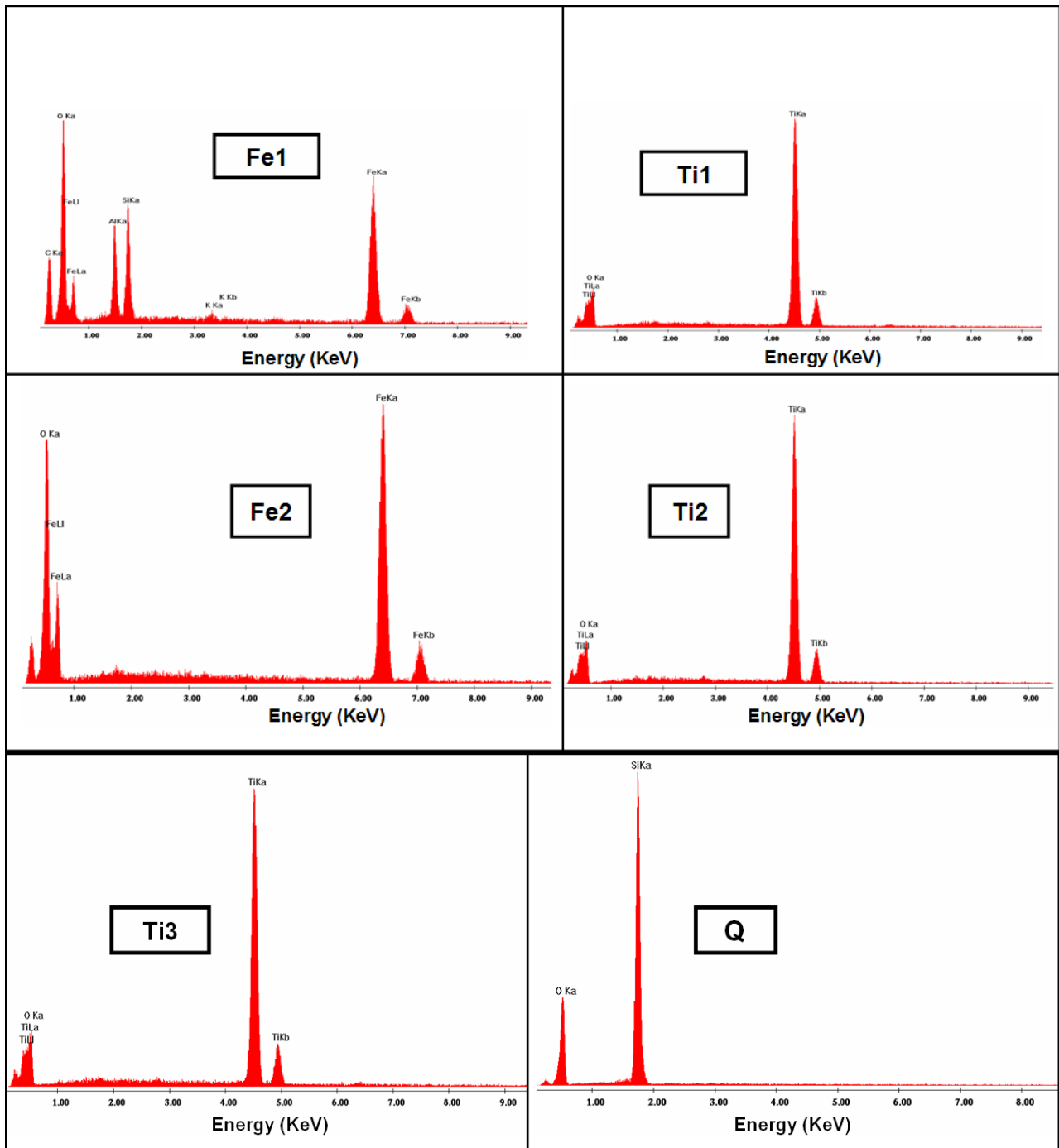


Fig. 116: Spectres EDS des minéraux 1050Ka

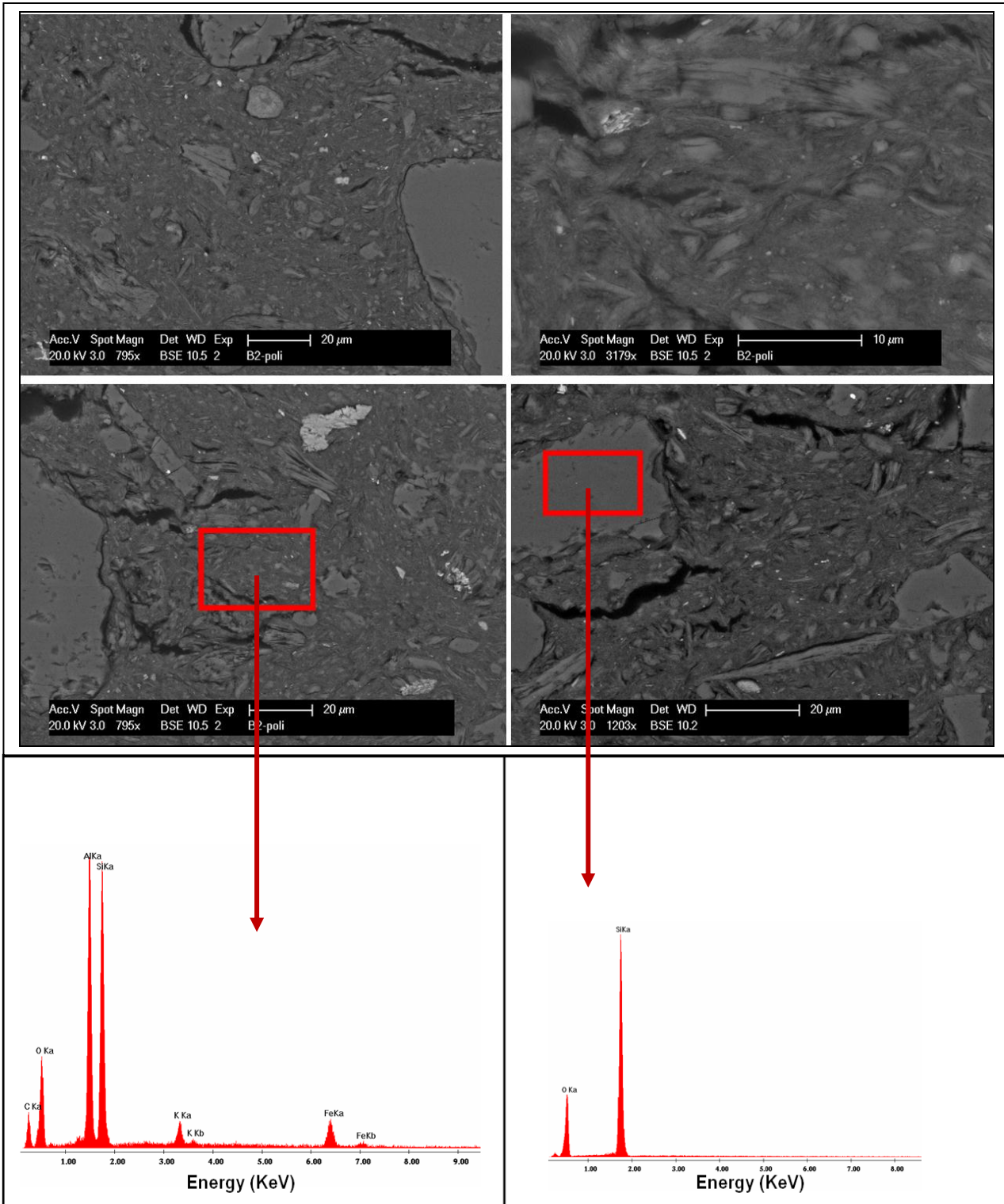


Fig. 117: Fissuration de la pâte 1050Ka

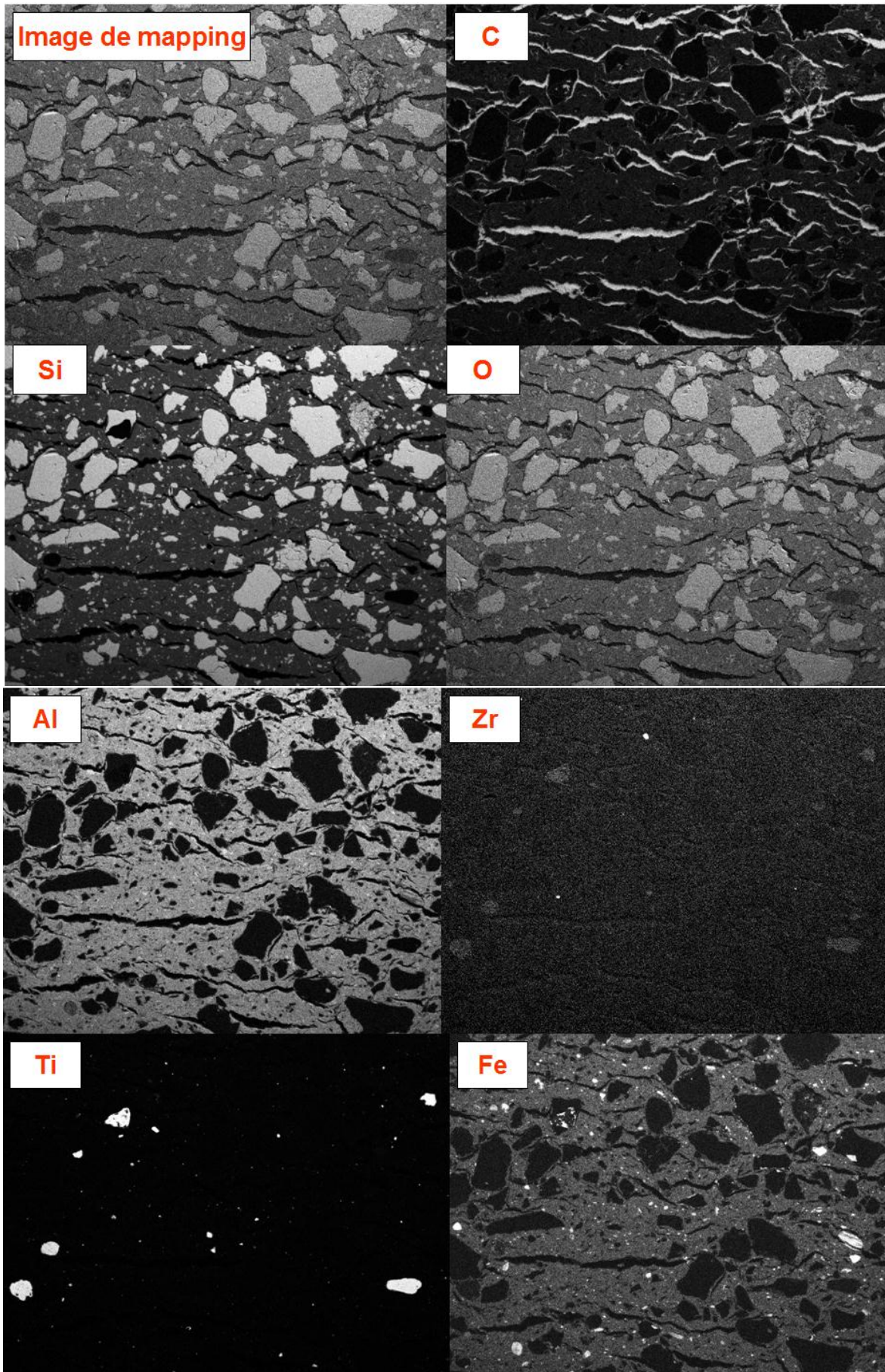


Fig. 118: Mapping des éléments constitutifs de 1050Ka

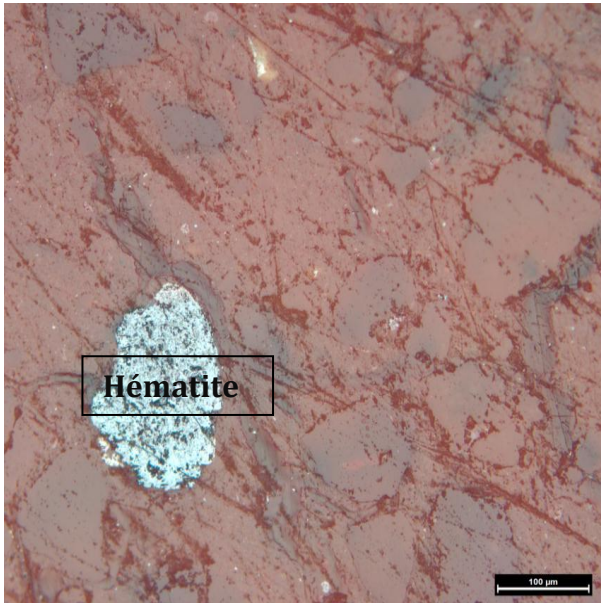
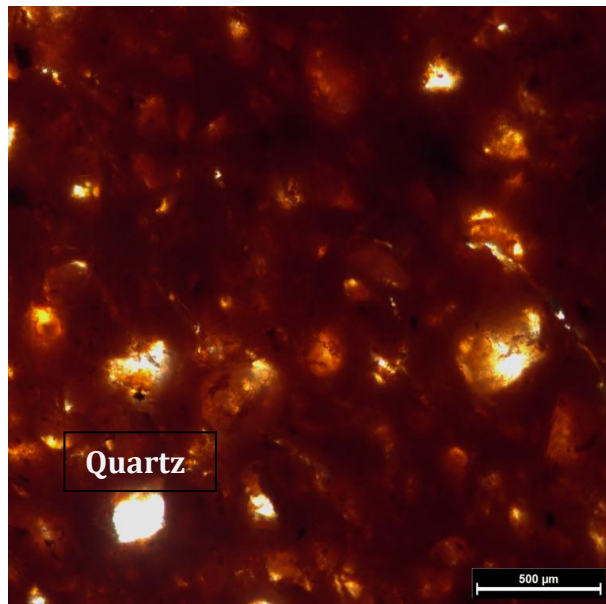
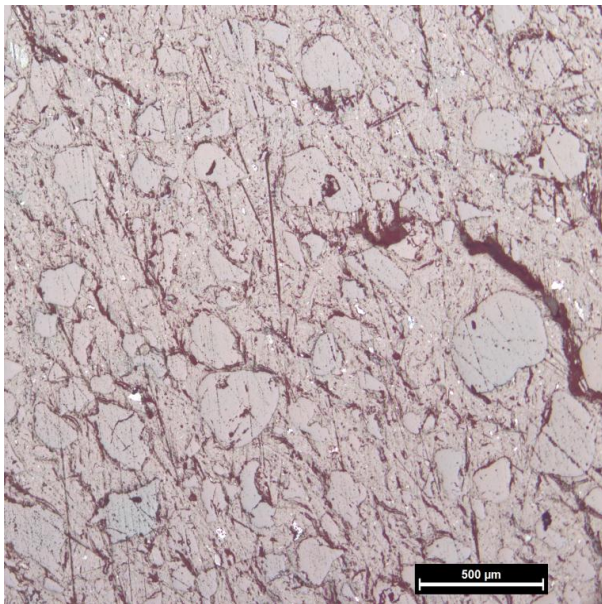
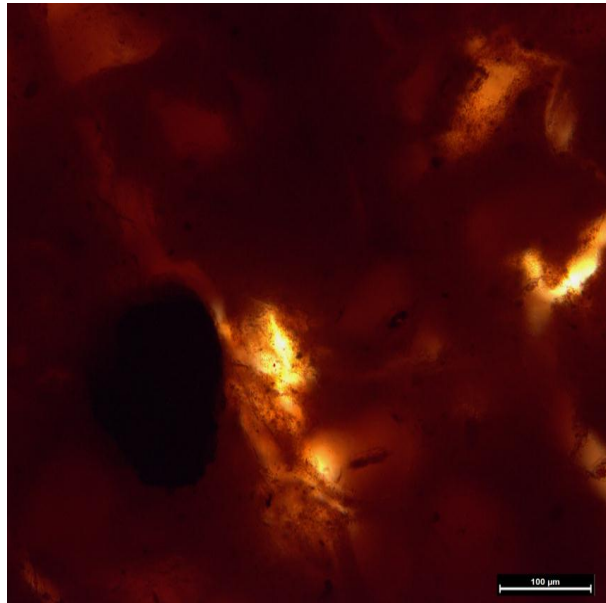
Lumière réfléchie*Lumière transmise*

Fig. 119: Photos des lames minces-1050Ka prises au microscope optique

Observés au MEB en électrons secondaires, les échantillons de briquettes de Kingabwa cuites à 1150°C montrent une pâte très compacte dans laquelle les rares cristaux ne sont visibles qu'à plus fort grossissement (à partir de 5000x). Ces derniers sont parfaitement adhérents ou collés à la pâte essentiellement silico-alumineuse, très peu fissurée et présentant toutefois quelques pores fermés (Fig.120). La cuisson de matériaux de Kingabwa a donc été accompagnée d'un degré de vitrification élevé, qui en fait de bons produits céramiques très résistants à la compression (MINLHEIRO E.A.C. et al., 2005 ; DJANGANG C.N. et al., 2008).

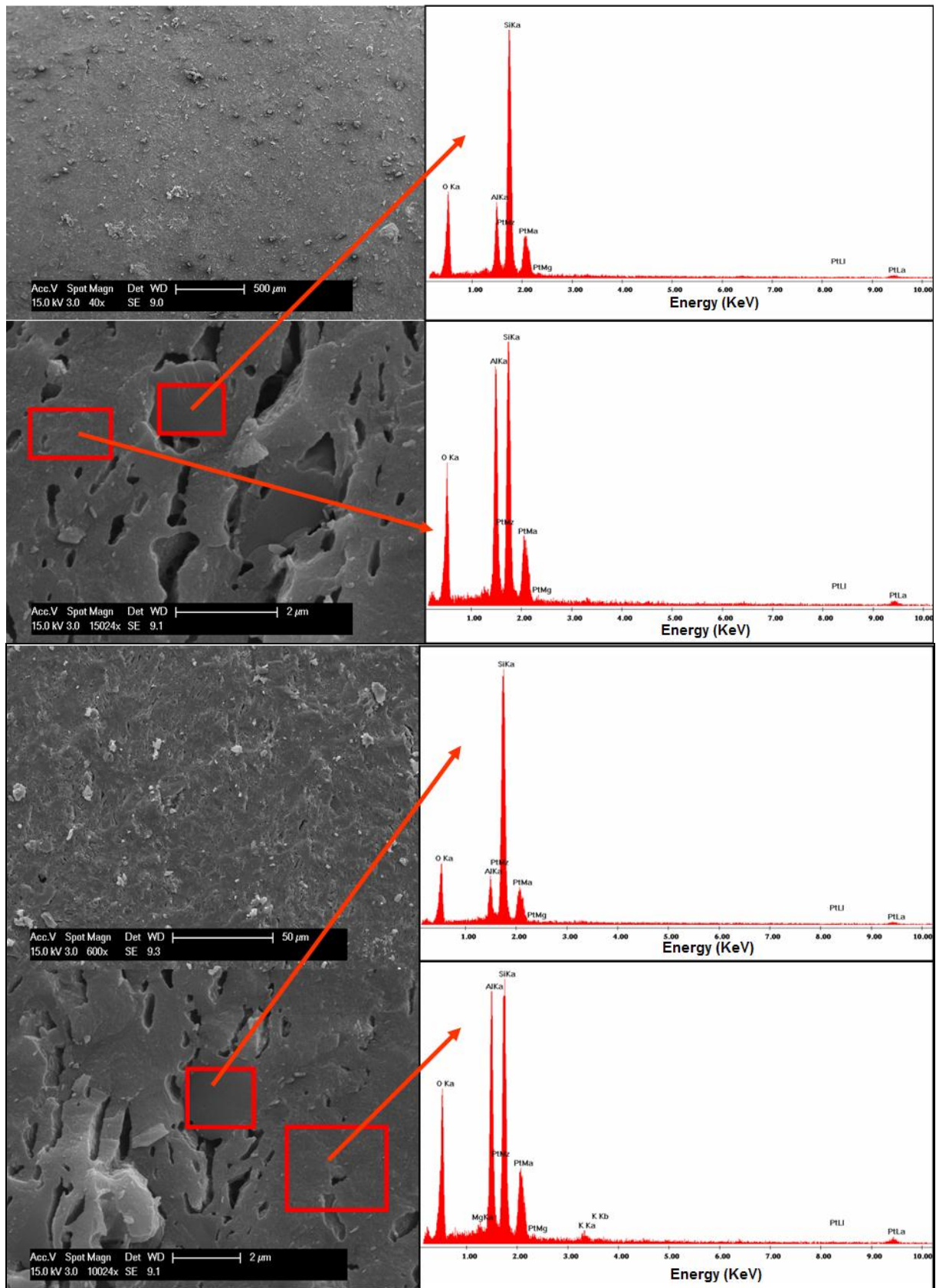


Fig. 120: Microphotographies de MEB (Electrons secondaires) et spectres associés de 1150Ki

Les particules des briquettes expérimentales de deux sites d'étude présentent de caractéristiques de formes et de tailles reprises dans les figures n° 121 à 123.

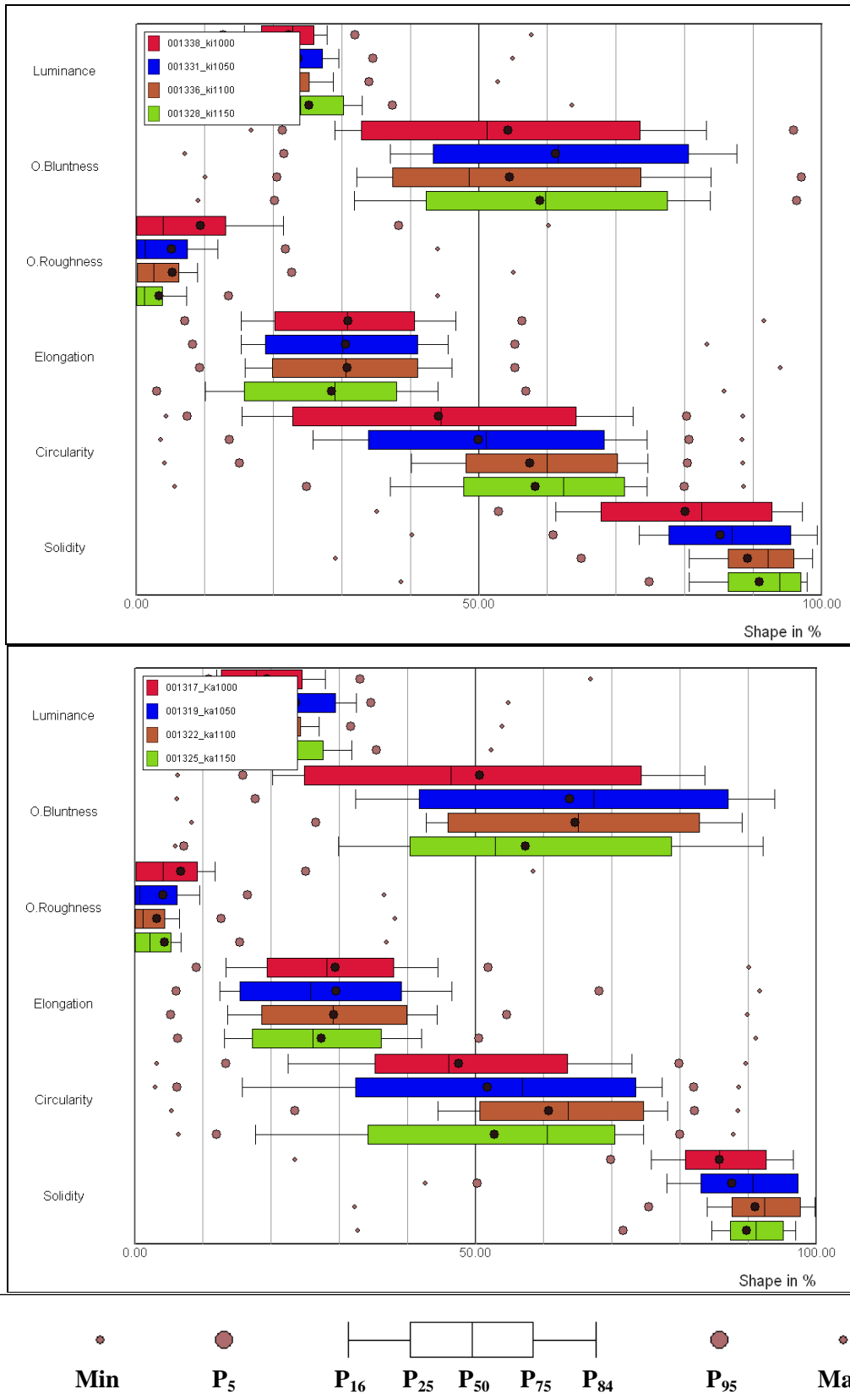


Fig. 121: Paramètres de forme des particules des briquettes cuites

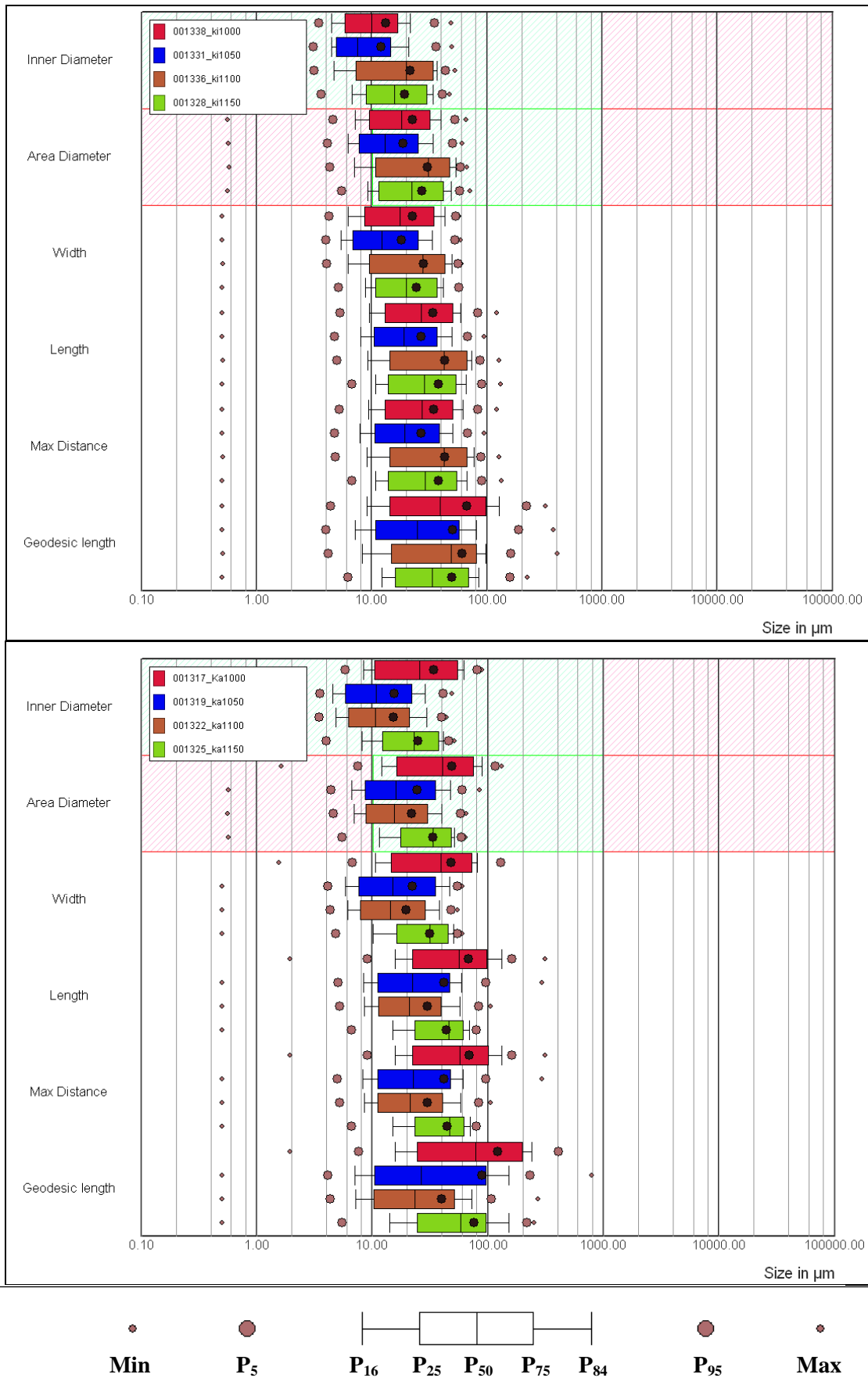


Fig. 122: Paramètres de tailles des particules des briquettes cuites

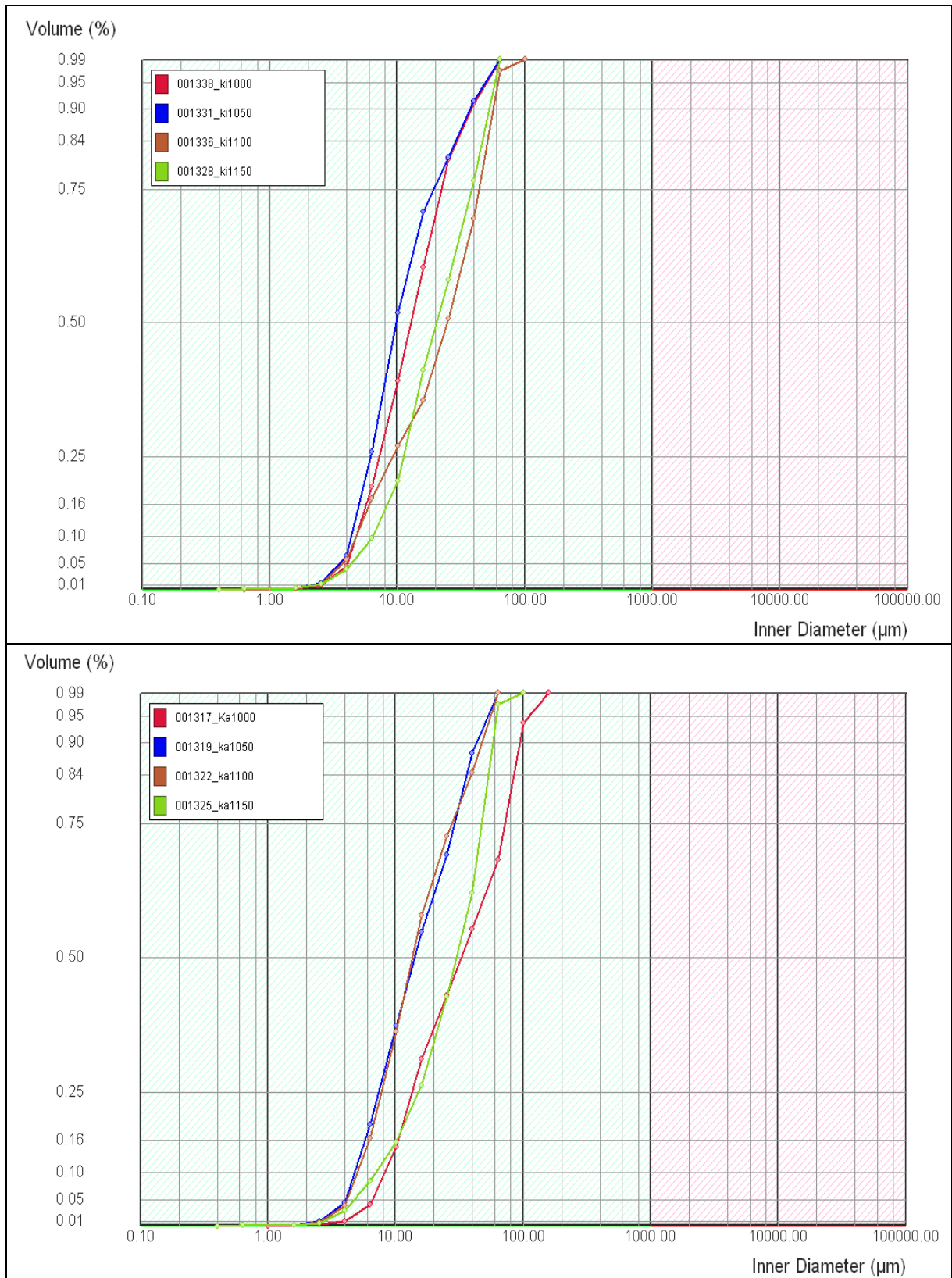


Fig. 123: Courbes cumulatives des particules des briquettes cuites

Alors que les valeurs statistiques moyennes de la rugosité et de l'élongation de particules des briquettes cuites de Kingabwa diminuent avec la température de cuisson, celles en émoussé, circularité et en solidité augmentent avec ce paramètre thermique. En élongation, les moyennes sont globalement égales au P_{50} pour toutes les températures de cuisson investiguées.

Les particules des briquettes de Kasangulu affichent un comportement différent de celles de Kingabwa. En effet, l'émoussé, la circularité et la solidité augmentent jusqu'à 1100°C et montrent une tendance à la baisse à la température de cuisson de 1150°C. Comme pour les particules des briquettes de Kingabwa, mais un peu moins, on note une diminution assez forte de la rugosité avec la température de cuisson.

Pour les deux cas, Kingabwa et Kasangulu, le phénomène de cuisson a été accompagné par un certain accroissement de la taille des grains (densification) des briquettes étudiées.

Les valeurs maximales du diamètre interne et du diamètre équivalent de particules de briquettes de Kingabwa varient faiblement avec la température de cuisson. Elles sont respectivement comprises entre 46 et 52µm et entre 60 et 71µm avec une tendance générale à la hausse avec la température.

Le diamètre interne maximal de particules de briquettes de Kasangulu décroît beaucoup avec la température : de 88µm à 1000°C à 44µm à 1100°C puis à 51µm à 1150°C. La même tendance s'observe pour l'ensemble de paramètres de la distribution :

- 80 µm (à 1000°C), 38 µm (à 1100°C) et 43 µm (à 1150°C) pour P_{90} ;
- 55µm (à 1000°C), 21 µm (à 1100°C) et 37 µm (à 1150°C) pour P_{75} ;
- 53 µm (à 1000°C), 24 µm (à 1100°C) et 32 µm (à 1150°C) pour $P_{84}-P_{16}$;
- 34 µm (à 1000°C), 15 µm (à 1100°C) et 24 µm (à 1150°C) pour la moyenne.

La figure n°123 montre que plusieurs particules des briquettes de Kasangulu cuites à 1150°C ont un diamètre interne inférieur à celles des briquettes cuites à 1100°C.

On note que les courbes Ka_{1000} et Ka_{1050} ont tendance à se superposer mais en revanche, celles de Ka_{1100} et Ka_{1150} se croisent tout en s'écartant. Les deux crossing-over de ces courbes définissent trois domaines d'écartement :

- le premier, le plus important, s'ouvre en un entonnoir, entre 22 et 100µm ;
- le deuxième, le plus faible, entre 10 et 22µm ;
- le troisième, entre les deux premiers pour les diamètres internes inférieurs à 10µm.

Les premier et troisième domaines correspondent aux cristaux ayant subi une diminution de volume et/ou ceux ayant réagi, en leur surface, avec la silice alumineuse mouillante comme observée au microscope électronique à balayage en mode électrons rétrodiffusés (Fig. 110).

Des faibles zones d'écartement des courbes cumulatives du diamètre interne des particules sont aussi observables dans les briquettes cuites de Kingabwa pour lesquelles on assiste à des faibles variations des caractéristiques de tailles des particules.

V.5. Conclusions partielles

Des briquettes cuites à 950°, 1000°, 1050°, 1100°, 1150°C ou stabilisées au ciment ont été fabriquées et étudiées en laboratoires. Ces produits céramiques élaborés proviennent des matériaux argileux kaolinitiques extraits des puits d'exploitation artisanale de Kasangulu et de Kingabwa en RD Congo.

Les caractéristiques technologiques et minéralogiques de ces produits sont très intéressantes pour justifier l'emploi des matériaux de base dans l'industrie céramique lourde (site de Kasangulu) ou fine pour la fabrication des produits à plus haute valeur ajoutée comme les porcelaines (site de Kingabwa), inexistantes ou trop peu développées en RD Congo.

Néanmoins, les produits cuits de Kingabwa ont présenté un retrait à la cuisson de 9 à 12% pour de températures allant de 1100 à 1150°C et une perte en poids à la cuisson de l'ordre de 14% en moyenne.

Pour une bonne rentabilité industrielle, ces retraits peuvent être minimisés par l'ajout d'une quantité optimale de dégraissant ou en revoyant à la hausse la température du séchage pendant l'élaboration des produits.

Il apparaît qu'en dehors de la composition chimique et minéralogique des substances premières, l'augmentation ou la diminution de la résistance mécanique à la compression des produits céramiques cuits à différentes températures n'est pas totalement dépendante de la porosité ou des retraits à la cuisson, ni de la simple quantité de mullite qui s'y trouve. Cette propriété mécanique est très sensible aux microstructures de la pâte et au développement des fissures, surtout celles en cercles concentriques autour des cristaux dans le matériau à haute température.

CHAPITRE VI : INTERET POUR UN DEVELOPPEMENT LOCAL DURABLE

VI.1. Introduction

Les substances minérales industrielles de type matériaux argileux de la région de Kinshasa sont peu connues et mal exploitées. Mise à part l'amélioration générale des compétences ou de l'expérience acquise dans le secteur du bâtiment et de travaux publics en rapport avec la politique du Gouvernement, la promotion de ces matériaux locaux dans la construction immobilière constitue un outil de développement intéressant.

Dans la région de Kinshasa et un peu partout au pays, les matériaux argileux ont été utilisés dans la construction traditionnelle et pendant l'époque coloniale même si on ne le désignait pas forcément par le terme « matériaux locaux ». Négligés pendant un certain temps, ces ouvrages servent de beaux exemples et sont d'actualité aujourd'hui.

A ce jour, en matière de terre cuite et de la céramique fine, le marché kinois est essentiellement alimenté par des produits importés qui coûtent chers et par des produits locaux de fabrication artisanale mais de mauvaise qualité.

Les matériaux locaux, en tant que concept et outil de développement, sont apparus au cours des années 1950 dans le vocabulaire courant (THEUNYNCK S., 1994).

En RD Congo, la promotion des matériaux locaux a été classée parmi les activités prioritaires d'urgence contenues dans le Plan d'Action National pour l'Habitat (Ministère T.P.A.H. et PNUD, 2000). Leur utilisation appropriée peut offrir au pays les avantages sur le plan de :

- la valorisation des ressources naturelles ;
- marché de matériaux de construction et de produits céramiques;
- respect des aspects esthétique, thermique, climatiques et autres ;
- l'incitation à la création des Petites et Moyennes Entreprises (PME).

VI.2. Valorisation des ressources naturelles

La mise en valeur de ressources minérales argileuses de la région de Kinshasa va lui permettre d'employer une conduite offensive pour ne pas subir, dans une attente défensive, ce que les marchés mondiaux ou environnants lui réservent comme surprises dans la filière de la céramique. La valorisation de ces ressources n'est pas seulement intéressante pour le marché domestique, mais aussi vis-à-vis de l'étranger.

La Province de Kinshasa dispose d'un potentiel important en substances minérales industrielles argileuses qui valent la peine d'être exploitées et mises sur le marché mondial. La commercialisation artisanale des argiles kaolinitiques de Kingabwa dans les marchés angolais et gabonais est éloquente. L'architecture en briques cuites ou stabilisées obtenues à partir des matériaux argileux de Kasangulu trouve tout son intérêt dans l'amélioration des conditions d'habitat et dans la réduction des coûts unitaires de la construction des maisons. En ce sens, ces matériaux argileux peuvent devenir des produits de marque pour la RD Congo. Ce pas a été déjà franchi au Niger où « tout le monde » connaît la Construction Sans Bois (CSB) (WYSS U., 2005).

Dans le secteur de la céramique grossière ou fine, très peu développée dans la région de Kinshasa, la valorisation des matériaux argileux peut, tant soit peu, contribuer à limiter les flux des devises vers l'étranger. A ce sujet, il y a lieu de souligner que même si on souhaite développer une véritable industrie de transformation locale de ces matériaux, des transferts de technologies seront nécessaires. L'équipement, les moyens de transport, l'énergie et la compétence industrielle proviendront en grande partie de l'étranger.

VI.3. Marché de matériaux de construction et de produits céramiques

La ville de Kinshasa, capitale de la RD Congo connaît ces dernières années une forte pression démographique qui ajoutée au faible pouvoir d'achat de sa population et au prix élevé des matériaux de construction dits « durables importés », contribuent à accroître le problème de la précarité et de la pénurie de logement d'une large partie de ses habitants. Ces facteurs qui réduisent la marge de manœuvre d'une grande partie de la population dans son accès à un habitat décent, s'opposent donc au rêve d'un habitat définitif qui est au centre des préoccupations ou des aspirations des kinois.

Les constructions des maisons dans la ville de Kinshasa sont, en grande partie, faites des murs en briques de ciment (Min. T.P.A.H., 1999). Le ciment utilisé pour fabriquer ces matériaux a connu ces dernières années plusieurs augmentations de prix jusqu'à atteindre des pics de 40 dollars par sac de 50 Kg (Tabl.82 et 83). La tôle galvanisée est utilisée dans 81%. La proportion de l'éternit et de la tuile prise ensemble ne dépasse pas 15% ; ces matériaux ne sont largement utilisés que dans les quartiers planifiés. C'est d'ailleurs dans les quartiers planifiés à revenus élevés que la tôle galvanisée est la moins employée (64%).

Tableau 82: Indicateurs de construction (en pourcentage) dans quelques villes de la RD Congo

Matériaux	Villes				
	Kinshasa	Matadi	Bandundu	Lubumbashi	Mbuji-Mayi
Béton armé	6,7	0,0	0,0	5,8	8,3
Murs en briques ciment	78,3	53,6	4,7	10,6	18,2
Murs en briques cuites	2,1	1,76	0,0	52,8	0,2
Murs en adobe	4,6	34,5	85,7	21,2	63,1(83,5 [*])
Murs en pisé	1,5	0,0	4,7(83,1 ^{**})	0,9	1,2
Tôle galvanisée	81,4	98,4	61,9	92,5	94,5
Eternit	10,5	0,0	0,0	1,9	0,0
Tuiles	2,3	1,5	0,0	4,7	0,6
Autres	5,8	0,0	38,1	0,9	4,8

* Mwene- Ditu ; ** Kikwit

Tableau 83: Variation du prix de ciment à Kinshasa

Années	1999	2008 – 2011
Population de Kinshasa (en millions d'habitants)	6	+/- 10
Prix du sac de ciment 50 Kg (en dollars)	Env. 8	40 – 12

Etant donné ce prix élevé du ciment et quelques pénuries liées notamment à la fermeture de la cimenterie de Lukaya en octobre 2008, il n'existe pas à Kinshasa des sociétés qui produisent et commercialisent des blocs ou parpaings en béton. La fabrication de ces derniers se fait sur site de construction ou par les artisans.

Le prix du bloc de ciment de 40x20x20 cm produit est fonction du prix du sac de ciment (qui intervient pour plus de 50% du prix de revient), du sable et autres agrégats (graviers). Pour un bon dosage, il est connu qu'un sac de ciment de 50 Kg devrait produire 20 à 30 parpaings de 40x20x20 cm creux, pesant 12,5 Kg et coûterait environ deux dollars par bloc.

Sur terrain, chez la plupart des fabricants artisanaux de ce secteur, le bloc de ciment coûte le quart ou le tiers de ce qu'il coûterait réellement si l'on respectait les proportions normales ou idéales du ciment à utiliser. On observe donc des grandes tentations et tendances à la tricherie sur les quantités de ciments de la part des fabricants qui arrivent fréquemment à obtenir 60 parpaings ou plus avec un sac de

ciment de 50 Kg, soit trois fois plus que la prescription. Cette logique a conduit à l'usage des matériaux de moins bonne qualité dans le secteur du bâtiment et des travaux publics à Kinshasa.

Localement, les produits en terre cuite offerts sur le marché de la province de Kinshasa sont essentiellement des briques pleines de mauvaises qualités (peu esthétique, faibles résistances, ...) provenant des briqueteries artisanales (par exemple Kasangulu) qui font recours aux fours de campagnes alimentés aux bois de chauffe. A Kasangulu, une brique pleine, cuite de 29,5x14x12 cm coûtait en 2008, entre 250 et 300 Francs congolais, soit environ 0,5 dollar.

La société de l'Ex-BRIKIN (Congo-Briques actuellement) qui alimentait le marché kinois en produits en terre cuite de toutes sortes (briques pleines, creuses, hourdis, claustra,...) se trouve dans un état de délabrement total. Son outil de production est devenu plus que vétuste, vétusté aggravé par le lotissement de certains espaces de son périmètre industriel et la perte de ses concessions de matières premières de Lutendele.

Aucune briqueterie ni tuilerie industrielles n'existent actuellement dans la Province de Kinshasa.

Pour toutes ces raisons, on observe sur le marché kinois plusieurs produits en terre cuite importés de l'Afrique du sud et de l'Europe. Quand bien même le marché soit favorable, cette importation des produits en terre cuite est marginale à cause de la forte demande et des coûts élevés de transport des produits. Ces produits importés devraient donc coûter plus cher à Kinshasa.

Les autres produits céramiques tels que les réfractaires, les carreaux pour sol ou murs, les appareils sanitaires, tuyaux en grès, céramiques ornementales ou domestiques (faïence, assiettes, plats, tasses coupes, vases, objets artificiels et de fantaisies en porcelaine) sont totalement importés de l'Afrique du sud, de la chine, de l'Europe et d'ailleurs.

A l'exception de la BOUKIN (société de bouteillerie de Kinshasa), la filière de la céramique fine est inexistante dans la province de Kinshasa comme un peu partout au pays.

L'exploitation des matériaux argileux en vue de la production locale des céramiques devient donc une alternative indispensable pour lutter contre des prix élevés des produits céramiques observés sur le marché de Kinshasa et environs.

C'est pourquoi la promotion des matériaux locaux est actuellement au cœur de la politique gouvernementale du pays qui vise à créer de l'habitat à moindres coûts ou encore à produire des matériaux de construction moins chers.

Selon CRATerre-EAG, « le prix du m² de murs en bloc de terre comprimée stabilisée est supérieur à celui du m² de murs en bloc de ciment mais le coût global de la construction reste très inférieur grâce à une économie faite avec l'absence de poteaux-poutres en béton armé, l'absence d'enduit extérieur et l'utilisation du bloc de terre en toiture ».

Mais la réduction des coûts de construction n'est pas uniquement liée à la réduction du coût des matériaux. Pour garantir une réalisation réellement économique, toutes les étapes (par exemple la mise en œuvre) du processus de construction sont à considérer.

VI.4. Respect des aspects esthétiques, thermiques, climatiques et autres

Les travaux de laboratoires réalisés sur les matériaux argileux de Kasangulu ont montré que ces derniers ont des caractéristiques d'utilisation industrielles intéressantes dans la filière briqueterie-tuilerie. Des produits en terre cuite et des blocs crus ou stabilisés peuvent en être fabriqués. Comparés aux autres matériaux de construction mis sur le marché de la région de Kinshasa, les produits en terre cuite qui pourront être fabriqués présentent des avantages à plusieurs niveaux.

VI.4.1. Tradition

Comme dans plusieurs villages, cités et villes de la RD Congo, les briques cuites ont été répandues dans la Province de Kinshasa et ses environs grâce notamment aux missions catholiques et durant l'époque coloniale.

Les populations de cette région ont donc vécu dans des habitations construites en terre cuite et ont pu en apprécier les avantages.

Les différentes constructions ou utilisations réalisées depuis belle lurette avec les matériaux argileux de cette région s'intègrent bien dans un contexte culturel local et peuvent se réclamer de :

- valoriser un patrimoine et un savoir-faire déjà existants;
- rétablir la fierté des propriétaires d'ouvrages traditionnels grâce à des détails techniques nouveaux.

VI.4.2. Esthétique

De par leurs caractéristiques physico-chimiques, les matériaux argileux de Kasangulu présentent des potentialités d'utilisation industrielle intéressantes et peuvent servir à la fabrication d'une gamme très variée des produits finis très esthétiques : belles couleurs orange ou rouge, uniformes et de forme très régulière.

Bien maçonnés ou posés, ces produits n'ont besoin d'aucun crépissage, enduit ou peinture. Leur aspect esthétique ne s'altère pas facilement avec l'âge. Par contre, les produits à base de ciment sont très peu esthétiques et nécessitent un enduit, un crépissage et peinture qu'il faut refaire régulièrement.

Les briques cuites constituent donc un matériau connu, acceptable et synonyme de qualité.

VI.4.3. Résistance à la compression et à l'érosion

Du fait que la construction d'un habitat demande des moyens importants, il est assez logique qu'on souhaite réaliser un habitat acceptable « une fois pour de bon » avec pas ou peu d'entretien à partir du moment où le bâtiment est achevé.

Les produits cuits à base des matériaux locaux de Kasangulu ont donné de résistances à la compression élevées, supérieures à 30MPa à 1050°C. Ces briques peuvent servir à construire des murs porteurs même des maisons en étage sans usage d'une ossature en béton armé.

Les parpaings en béton fabriqués avec les bonnes proportions de ciment (1 sac de ciment de 50 Kg pour 20 parpaings) ont une résistance à la compression également élevée. Malheureusement, en réalité sur terrain, la proportion de ciment, à cause de son coût élevé, est beaucoup plus faible. Les parpaings en ciment ont alors une très faible résistance à la compression qui atteint très rarement les valeurs de 10 MPa, et ne résistent donc pas à l'érosion.

Ces genres des produits sont à déconseiller dans la région de Kinshasa qui fait partie d'une zone tropicale où les précipitations sont trop importantes surtout pendant la saison des pluies. Les violents orages de mai 1990 et de novembre 2009 à Kinshasa ont occasionné l'effondrement de plusieurs maisons faites en parpaings en ciment. Ces deux événements climatiques ont coûté la vie à des nombreuses personnes.

A ce propos, la terre cuite est avantageuse : elle ne s'érode pas et sa durée de vie est illimitée surtout qu'il n'y a pas de risques de gel à Kinshasa.

Les blocs en terre stabilisée ou crue peuvent quant à eux, présenter des résistances aux compressions supérieures ou égales 10 N/mm^2 mais résistent moins bien à l'érosion qu'un bloc en béton ou que les produits en terre cuite. La construction d'une maison avec ces genres des matériaux impose de prendre quelques précautions liées:

- a) aux fondations : comme la terre stabilisée n'est pas recommandée pour les fondations, il vaut mieux utiliser des matériaux tels que des pierres ou des briques cuites assemblées au ciment, du béton ;
- b) à la protection des mûrs : le contact direct de la pluie avec la maçonnerie est à éviter afin d'empêcher l'érosion des blocs. Pour ce faire, il est recommandé de :
 - protéger la base du mûr avec du mortier ciment/sable (60 à 70 cm) de hauteur pour le protéger de l'éclaboussement de l'eau ;
 - faire dépasser le toit de 60 à 70 cm du mûr ;
 - appliquer un enduit spécial (ou chimique) sur le mûr pour le protéger de l'humidité.

VI.4.4. Ecologie et recherches technologiques innovantes

Pour la fabrication des briques cuites et des blocs crus ou stabilisés, on exploite, en carrière, les matières argileuses. Les dégâts environnementaux et/ou écologiques sont donc similaires surtout s'il s'agit d'une exploitation industrielle, semi-industrielle ou artisanale encadrée par un organisme spécialisé.

Par contre, comparée à la fabrication des briques cuites (analyse de cycle de vie), la production des briques crues et stabilisées paraît une opération écologique car elle n'engendre pas d'émission de gaz à effet de serre (dioxydes de carbone et de soufre) si ce n'est celle due à la fabrication du ciment ou de la chaux employée pour la stabilisation. Les maisons construites en argiles crues ne polluent pas de façon majeure leurs sites après leur destruction. A l'heure actuelle où le recyclage devient de plus en plus une nécessité, on conçoit bien l'avantage que cela représente.

Du fait de l'utilisation des fours, le secteur de la fabrication des briques cuites compte parmi les grands consommateurs de l'énergie. Le gaz naturel, les produits pétroliers et l'électricité sont les principales énergies utilisées.

De nombreuses pistes de recherches technologiques innovantes sont actuellement explorées pour la production de matériaux céramiques à faible énergie et peu émettrice des gaz à effet de serre. C'est notamment le cas de :

- la résistance à la compression de 60 MPa peut être atteinte selon la quantité de réactif GEOPOLY KNA et dans la fourchette des températures de réticulation géopolymérique LTGS de 85-450°C (Fig.124).

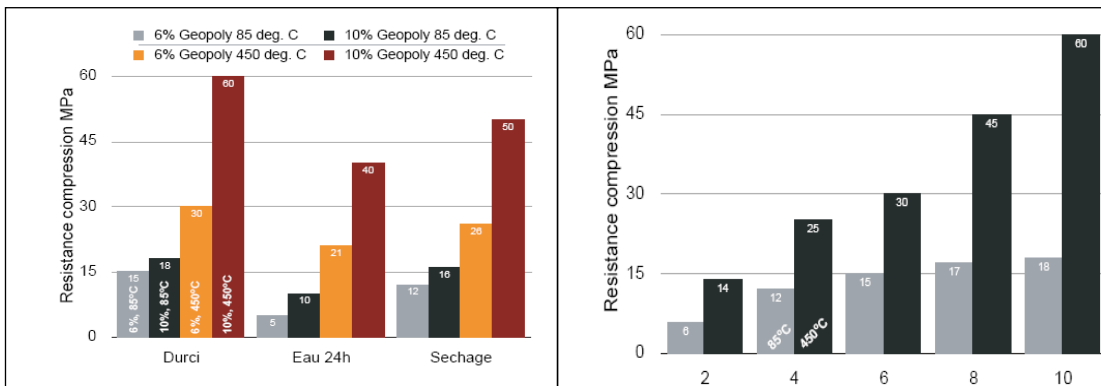


Fig. 124: Résistance mécanique à la compression des briques LTGS (BOUTTERIN C., DAVIDOVITS J., 2003)

Les matériaux fabriqués par cette technologie conservent la qualité de confort propre aux matériaux terres (pisé, adobe, ...) qui n'est pas perturbée ni par les traitements thermiques (85-450°C), ni par les quantités de réactif GEOPOLY ajoutées. Ces géopolymères obtenus par LTGS constituent la matrice de la brique (en jouant le rôle de « climatiseur ») et présentent des propriétés dites zéolithiques, c'est-à-dire la propriété de « respirer », d'être en équilibre hygrométrique constant avec l'intérieur de l'habitation et de plus de constituer un excellent matériau d'isolation contre le chaud. C'est donc une technologie qui mérite d'être testée en RD Congo.

VI.4.4.2. Biominéralisation

Au travers de certains organismes (Diatomées, Coccolithes, Coques d'œuf de poule, ...), on voit que la synthèse de ciment (à base de calcaire et silice) à basse température est possible. Ne peut-on pas exploiter ces organismes (Fig.125) pour fabriquer des bio-ciments, avec une énergie moindre, et peu émettrice de gaz à effet de serre dont le CO₂ ?

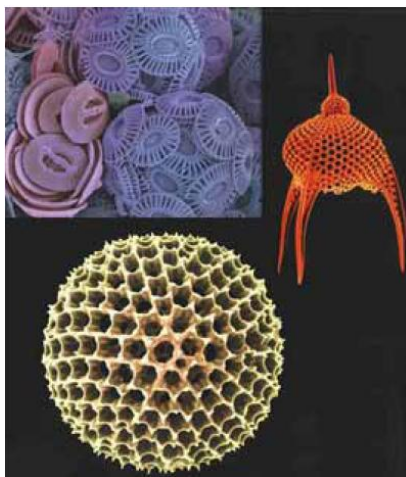


Fig. 125: Quelques organismes unicellulaires (COULOMBEL J. et al., 2010)

VI.4.4.3. Brûleurs à tube radiant

Des essais en laboratoire ont montré qu'une réduction de la teneur en eau de l'atmosphère du four (à des températures de 800°C et plus) entraînait bien une réduction des émissions de HF, tout comme des émissions de SO_x. On peut éviter la production d'eau obtenue lors de la combustion des combustibles fossiles utilisés en chauffant le four indirectement, avec des brûleurs à gaz à tube radiant.

Ces brûleurs à tube peuvent en principe s'appliquer aux industries des carreaux pour sols et murs, de la vaisselle et des objets décoratifs, des appareils sanitaires, des céramiques techniques et des abrasifs inorganiques. Mais pour les secteurs de la briqueterie et de la tuilerie, des tuyaux en grès, des réfractaires et des granulats d'argile expansée, la fabrication est à trop grande échelle.

Lors d'un projet pilote mené au Pays-Bas, dans lequel un four à rouleaux avait été équipé de brûleurs à tube radiant pour la fabrication de carreaux pour sols et murs, on a observé des émissions de HF entre 0,7mg/m³ (fabrication de carrelages muraux) et 1,2mg/m³ (fabrication de carrelages pour sols), avec des coefficients d'émissions spécifiques de HF entre 3 et 6 mg/kg. Les coûts supplémentaires liés au matériel des brûleurs à tube radiant et au fonctionnement d'un four d'une capacité de production de 500.000 m² de carrelage par an ont été estimés à 450.000 euros (INFOMIL, 2003).

VI.4.4.4. Cuisson assistée par micro-ondes et séchoirs à micro-ondes

Des travaux de recherches considérables ont été menés sur l'application d'énergie sous forme de micro-ondes lors de la cuisson des céramiques. Ce processus chauffe les produits directement, y compris le centre des produits. Afin d'éviter les pertes de

chaleur excessives dans la structure du four, on utilise l'énergie des micro-ondes en associations avec un chauffage conventionnel tel que le gaz ou l'énergie électrique.

Avant de pouvoir appliquer ce processus de façon économique sur des fours de fabrication à grande échelle, il reste à résoudre certains problèmes techniques, notamment les aspects sécuritaires, de même qu'il faut tenir compte des coûts de l'énergie électrique qui sont relativement élevés. Toutefois, des travaux expérimentaux ont mis en lumière un certain nombre d'avantages et/ou inconvénients qu'il conviendra de développer à l'avenir lors de séchage ou de cuisson assistés par micro-ondes (CERAME-UNIE, 2004 ; TWG, 2005):

- minimisation des contraintes thermiques sur l'ensemble du cycle de cuisson ;
- nette augmentation des débits de production, grâce à des cycles de cuisson beaucoup plus courts ;
- améliorations en qualité, notamment des gains significatifs dans les propriétés mécaniques ;
- réduction des émissions grâce à une consommation énergétique moindre et à une plus grosse production ;
- réduction des émissions de fluorures étroitement liées au temps passé par le produit au-dessus de 800°C ;
- réduction des déchets de production solides ;
- importante réduction de la consommation énergétique pour la cuisson, mais éventuellement moins de chaleur résiduelle disponible pour le séchage.

VI.4.4.5. Nouveau type de système de séchage pour les produits réfractaires

Le séchage d'éléments de construction réfractaires de taille importante tels que couvercles de poches ou voûtes de fours à arc électrique peut être de longue durée et très gourmand en énergie.

Les fibres de carbone peuvent s'utiliser à des températures pouvant atteindre environ 250°C, et les plaques métalliques à des températures plus élevées, qui peuvent atteindre 1100°C. Des essais réalisés sur un élément de construction de 9 tonnes ont montré que le besoin énergétique initial pour le séchage était de 77000 kwh sous une humidité résiduelle de 6%. L'installation de plaques chauffantes et d'isolants lors du séchage a permis de réduire ce besoin énergétique à 2000 kwh, ce qui correspond à une économie d'énergie d'environ 97%. Le temps de séchage a diminué de 5 à 3 jours environ. Ces économies de temps et d'énergie peuvent encore être plus importantes dans le cas de très gros éléments de construction pouvant peser jusqu'à 20 tonnes.

Cette technique est employée par plusieurs fabricants, par exemple Wolf GmbH, Urbar, Allemagne (TWG CERAMICS, 2005 et 2006).

VI.4.5. Isolations thermique et acoustique

Les murs en briques servent de régulateurs d'humidité de l'air ambiant. La terre cuite est excellent isolant thermique, son coefficient K de conductibilité thermique (0,69w/mk) est de loin supérieur au béton (1,37w/mk) (CERATEC, 1987).

Les tuiles en terre cuite sont également beaucoup plus isolantes que les tôles métalliques ondulées les plus fréquemment utilisées actuellement à Kinshasa ou les nouvelles tôles métalliques embouties avec un relief, imitation tuile, que l'on voit apparaître sur le marché kinois. Les couvertures en tuile de terre cuite ne transmettent pas des bruits, alors que l'impact des gouttes de pluies sur des tôles ondulées ou galvanisées génère énormément de bruit. Ceci rend impossible toute conversation ou travail surtout en milieu éducatif ou dans un centre hospitalier.

VI.5. Encadrement des exploitants et incitation à la création des PME

VI.5.1. Filières céramiques envisageables

La perspective de développement local durable lié à l'exploitation des matériaux argileux de la région de Kinshasa impose de promouvoir la croissance économique, de satisfaire aux besoins sociaux et environnementaux des populations locales présentes et futures.

Dans ce but, l'Etat congolais, par l'un de ses services spécialisés en l'occurrence le Service d'Assistance et d'Encadrement du Small Scale Mining (SAESSCAM) du Ministère des Mines (RD Congo, 2002 et 2003), a un rôle capital à jouer : susciter (appels d'offre) et encourager la création des Petites et Moyennes Entreprises (PME) et pourquoi pas des grandes sociétés dans le secteur de la céramique inexistant ou trop peu développé dans la région de Kinshasa.

Au regard des caractéristiques physico-chimiques et géotechniques des matériaux de base, deux filières de la céramique sont envisageables:

- une fine pour l'exploitation, la commercialisation des argiles kaolinitiques plastiques de la vallée de la Ndjili et éventuellement la production des carreaux, des porcelaines, des réfractaires silico-alumineux et des kaolins de charge ;
- une grossière, « la Briqueterie et Tuilerie » à Kasangulu (BTK), pour la fabrication d'une gamme très variée de matériaux de construction locaux améliorés tels que briques cuites, hourdis, claustras, dalles,.....

Les sacs plastiques, les cartons, les pneus en caoutchouc et les déchets de scieries que l'on voit un peu partout dans les rues de Kinshasa ou ceux (bagasses) obtenus lors de la fabrication de sucre à la sucrière de Kwilu-Ngongo située à ± 150 km de Kasangulu peuvent être valorisés pour servir de combustibles pour cuire les briques ; ce qui permettrait de limiter le recours aux charbons de bois et aux arbres fruitiers (CERATEC, 1997).

Plusieurs briqueteries d'Afrique sont opérationnelles et fonctionnent avec des fours alimentés par les déchets végétaux utilisés comme combustibles (Tabl. 84 et 85).

Tableau 84: Pouvoirs calorifiques des combustibles

Type	Nature	Pouvoir calorifique
Combustibles légers	Gaz-oil	10.150 Kcal/Kg
	Fuel léger	10.030 Kcal/Kg
	Fuel moyen	9.792 Kcal/Kg
	Fuel lourd	9.553 Kcal/Kg
	Alcool	6.450 Kcal/Kg
	Benzène	9.600 Kcal/Kg
	Toluène	9.765 Kcal/Kg
	Pentane	10.860 Kcal/Kg
	Hexane	10.680 Kcal/Kg
Combustibles gazeux	Gaz naturel	8.400 Kcal/Nm ³
	Butane	29.539 Kcal/Nm ³
	Propane	22.189 Kcal/Nm ³
	Gaz de ville	3.850 Kcal/Nm ³
Combustibles solides	Lignite	2.000-5.000 Kcal/Kg
	Tourbe	2.200-3.500 Kcal/Kg
	Bois (secs)	3.600-5.000 Kcal/Kg
	Bagasse	2.000-4.000 Kcal/Kg
	Coton	3.300 Kcal/Kg
	Parches de café (séchées)	3.000 Kcal/Kg
	Cosses de cacao	2.600-3.900 Kcal/Kg
	Carton	3.700 Kcal/Kg
	Papiers	3.900-4.000 Kcal/Kg
	Balles de riz	2.900 Kcal/Kg
	Morceaux de bois (frais ou séchés à l'air)	2.560-3.650 Kcal/Kg
	Coquilles de tournesol	4.270 Kcal/Kg
	Pâte de paille lessivée	3.400 Kcal/Kg
	Déchets de tabac	2.300 Kcal/Kg
	Ecorce	1.500-2.500 Kcal/Kg
	Pneus en caoutchouc	8.100 Kcal/Kg
	Sciures	2.250-2.800 Kcal/Kg
	Polypropylène	11.000 Kcal/Kg
	Polyéthylène	10.000 Kcal/Kg
	PVC	4.500 Kcal/Kg
	Coques de noix de coco	6.500 Kcal/Kg
	Papier d'emballage	4.000 Kcal/Kg
	Journaux	4.430 Kcal/Kg
	Sacs plastiques	6.300 Kcal/Kg
	Charbon de bois	8.500 Kcal/Kg
	Tiges + Fanes de maïs	3.200 Kcal/Kg
	Graines de coco avant pressage	7.500-8.500 Kcal/Kg
	Coques de noix palmistes	6.423 Kcal/Kg
Tourteau de KARITE	10.215 Kcal/Kg	
Coques d'arachides	4.700 Kcal/Kg	

Tableau 85: Briqueteries d'Afrique utilisant les déchets végétaux comme combustibles

Pays	Lieu	Production annuelle (T/an)	Type du four	Combustibles végétaux	Etat
GUINEE CONAKRY	Milo-Kankan	20.000	Tunnel	Graines de coton	En activité
RWANDA	Amegerwa/Kigali	9.000	Rectangulaire	Parches de café	
	Ruliba/Kigali	15.000	Tunnel	Parches de café	
MALI	TCB/Bamako	20.000	Hoffmann	-Graines de coton -Bois de chauffe	
TCHAD	Helico/N'Djamena	20.000	Hoffmann	Graines de coton	
BENIN	Agbodomey	9.000	Rectangulaire	Coques de noix palmistes	
UGANDA	Kampala-Entebbe	36.500	Hoffmann	Parches de café	
MAROC	Plusieurs			Grignons d'olive	
CAMEROUN	Yaoundé		Hoffmann Voûte	Sciures	
SENEGAL	Dakar			Coques d'arachides	
BURUNDI	Bujumbura	9.000	Rectangulaire	Parches de café	Rénovation (CERATEC)
RD CONGO	Kwilu-Ngongo	20.000	Hoffmann	Bagasses de canne à sucre	Projet (CERATEC)

Le four tunnel peut être envisagé dans la future usine BTK de Kasangulu en RD Congo. Le matériel minimum complémentaire peut être constitué de (CERATEC, 1997):

- presses manuelles ou automatiques ;
- désagrégateur ;
- étireuse et filières;
- camions ;
- doseur linéaire (trémie) ;
- bande transporteuse ;
- coupeur multifils ou coupeur automatique ;
- pupitre de commande électrique ;
- pelle chargeuse ou excavateur hydraulique ;
- chariots élévateurs et/ou brouettes ou des transbordeurs ;
- mouilleur-mélangeur et laminoir à cylindres ;

- pompe à eau et réservoir ;
- armoire électrique ;
- broyeur si nécessaire ;
- séchoirs ;
- wagons ;
- empileuse ;
- ordinateurs et appareils de mesure de résistances.

Cette briqueterie pourra alors, de manière durable, contribuer à l'amélioration des conditions de logement des habitants de cette région qui vivent dans une promiscuité inacceptable. Dedensifier le parc logement actuel et offrir une unité d'habitation décente à chaque ménage, lui assurant l'intimité et l'indépendance s'inscrit dans le respect de la déclaration d'Istanbul (Conférence des Nations Unies sur les Etablissements Humains, Habitat II) dont la RD Congo est signataire.

Dans l'hypothèse d'une production locale (à Kasangulu) des briques crues et/ou stabilisées, le matériel minimum serait composé de (CERATEC, 1987 ; CRATERRE-EAG, 1995 ; CDI-CRATERRE, 1996):

- presses manuelles ou automatiques ;
- mélangeur avec ou sans bande transporteuse et rampe d'accès ;
- désagrégateur avec ou sans bande transporteuse et rampe d'accès pour l'alimentation ;
- élévateur ;
- tamis ;
- brouettes ;
- tonneaux ;
- pioches, houes, pelles ;
- brosses ;
- seaux et arrosoirs ;
- couteaux ;
- feuilles en plastique ;
- réservoir d'eau ;
- huile moteur et diesel ou alimentation en électricité ;
- graisse lubrifiante ;
- clefs et outillage pour presses ;
- équipement de test pour les blocs et appareils de mesure de résistances.

Les infrastructures à aménager et qui seraient associées à une telle production sont celles de: stockages des matériaux et équipements, tamisage, mélange, moulage et de laboratoire.

En effet, la réussite d'une activité industrielle ou semi-industrielle de la filière céramique dans un site exploité par les artisans (comme à Kasangulu et à Kingabwa) passe par l'identification de ces derniers, leur formation et leur intégration (même partielle) dans une nouvelle vie professionnelle.

En se conformant à la réglementation en vigueur, les nouveaux opérateurs semi-industriels ou industriels vont apporter leur contribution (RD CONGO, 2002 et 2003):

- au développement des communautés locales notamment par la rétrocession d'une partie des revenus tirés de l'exploitation des produits de carrière et la réalisation des ouvrages d'intérêt communautaire en faveur des populations affectées par lesdits projets ;
- à la protection de l'environnement concerné pendant les phases opérationnelle et post-fermeture (réhabilitation des sites) (Tabl.86).

Le Gouvernement central sera aussi bénéficiaire de l'exécution de ces projets par :

- les paiements des droits superficiaires annuels par carré, de la redevance minière et de 5% non diluables du capital social de toute société qui sollicite un permis d'exploitation ;
- les paiements de tous les types d'impôts et taxes relatifs à la loi fiscale en vigueur en RD Congo ;
- la réalisation de sa politique en matière notamment de la reconstruction, de la création des emplois, de la protection de l'environnement et de la prévention des risques naturels dans les sites d'exploitation artisanale des produits de carrière.

Tableau 86: Autorisations exigées pour la recherche et l'exploitation des produits de carrière

Type de Permis	Nom du Permis	Autorité compétente	Etude environnementale
Droit de Carrières de Recherches	Autorisation de Recherche des Produits de Carrière	Division Provinciale des Mines (pour matériaux de construction seulement)	PAR (avant le début des travaux)
Droit de Carrières d'Exploitation	Autorisation d'Exploitation de Carrière Permanente	-Division Provinciale des Mines (pour matériaux de construction) -Ministère des Mines (autres matériaux)	EIE et PGEP (soumis avec la demande de Permis)
	Autorisation d'Exploitation de Carrière Temporaire	-Division Provinciale des Mines (pour matériaux de construction) -Ministère des Mines (autres matériaux)	PAR (soumis avec la demande de Permis)

Préalable à une éventuelle autorisation de la recherche ou de l'exploitation des produits de carrière, les études environnementales (PAR et EIE) constituent des processus qui visent la prise en compte de toutes les incidences d'un projet donné sur l'environnement tout au long des phases de réalisation dudit projet depuis sa conception jusqu'au réaménagement éventuel du site en passant par l'exploitation. Ensemble des informations fournies par le demandeur, par l'étude environnementale, par les opinions et réactions des instances et du public susceptibles d'être concernées par le projet, ces études sont, pour l'autorité compétente, un des outils nécessaires à sa prise de décision. Elles doivent aider le maître d'ouvrage à concevoir un projet le plus respectueux possible du milieu dans lequel celui-ci s'inscrit, tout en étant acceptable aux plans techniques et économiques.

Par l'analyse et l'interprétation des relations et interactions entre les facteurs exerçant une influence sur le milieu biophysique, les ressources naturelles et le milieu humain, elles vont permettre de mettre en évidence l'ensemble des incidences probables ou prévisibles, subjectives ou objectives, directes ou indirectes, réversibles ou permanentes qui résultent d'un effet objectif causé par une action et ce à court, moyen et long terme.

VI.5.2. Incidences environnementales potentielles

Deux groupes d'éléments méritent une particulière attention lors de la réalisation ou de la recevabilité d'une étude environnementale en vue de l'exploitation des matériaux argileux pour la fabrication des produits céramiques :

1°) Les trois phases principales qu'il convient d'analyser :

- la phase de chantier ;
- la phase d'exploitation ;
- le cas échéant, la phase de réaménagement après la fin de l'exploitation.

Dans ces phases, cinq catégories générales de facteurs de perturbation du milieu peuvent être identifiés, à savoir :

- les caractéristiques susceptibles d'effets liées à l'encombrement du projet comme les facteurs de forme de l'immobilier, la consommation de sol ;
- les caractéristiques de consommation de ressources naturelles qui permettent d'identifier et/ou quantifier cette consommation sur les ressources du milieu local et/ou extra local ;
- les rejets et/ou émissions associés au projet ;
- les stockages internes considérés comme de fréquentes sources de risque d'émission accidentelle ou récurrentes ;
- les impacts propres au type de projet considéré.

2°) Les composantes du milieu naturel qui sont d'une part le milieu biophysique (le climat et l'ozone stratosphérique, l'atmosphère, l'eau, les biotopes, le sol et le sous-sol) et d'autre part, le milieu humain (les déchets, les ressources naturelles du sol et du sous-sol, la santé/sécurité, le cadre de vie ; les biens matériels et le patrimoine).

Les principales incidences environnementales potentielles que peuvent occasionner l'exploitation des matériaux argileux et la fabrication de produits céramiques sur les composantes du milieu naturel sont ainsi résumées comme suit (VOLAND T. et al., 2004).

VI.5.2.1. Air

La principale source de production de gaz à effet de serre dont le CO₂ est liée à la combustion des matières fossiles. Le tableau n°87 présente la teneur en carbone de principaux combustibles fossiles.

Tableau 87: Teneur en carbone de combustibles fossiles (Agence Internationale de l'Energie, 1991)

Combustibles	Teneur en carbone (Kg de carbone/Gigajoule)
Combustibles ou carburants de synthèse	39,0
Charbon	25,8
Pétrole	20,0
Gaz naturel	15,3

Il se dégage que, dans le choix des combustibles, le gaz naturel est de loin le meilleur du point de vue des émissions de dioxyde de carbone : une fois brûlé, il dégage 25 à 30% moins de CO₂ que le fuel lourd et 40 à 45% moins de CO₂ que le charbon. L'emploi du gaz naturel comme combustible est de plus en plus généralisé car il conduit aussi à la réduction des émissions des précurseurs d'ozone troposphérique et de sous-produits à caractères oxydants comme NO_x liés à l'activité de fabrication des céramiques.

Concernant la Province de Kinshasa et environs, la fabrication de produits céramiques peut faire recourt aux combustibles végétaux (dont les teneurs en carbone doivent être déterminées) comme il a été mentionné ci-haut au regard de l'inexistence de gaz naturel. Dans cette optique, la réduction des émissions de CO₂ passe par l'optimisation de la consommation de l'énergie : utilisation des fours continus, conception de fours et réutilisation des gaz chauds au niveau des séchoirs.

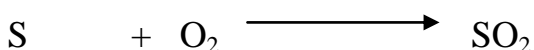
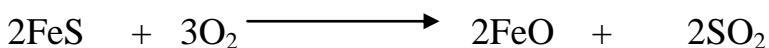
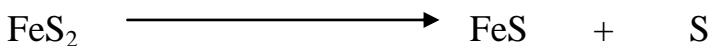
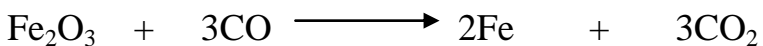
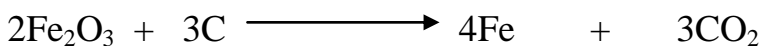
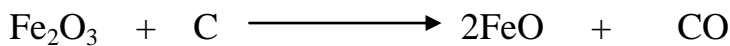
Par ailleurs, il y a lieu de signaler que plus au large, à plus ou moins 500 Km de Kinshasa, dans le bassin sédimentaire côtier à Muanda, de quantités de gaz sont

continuellement brûlées à la torche dans les champs d'exploitation pétrolière de l'Offshore Congo. L'utilisation de ces combustibles moins riches en carbone dans les futures usines céramiques des environs de Kinshasa peut être envisagée à condition de la réalisation d'une étude de faisabilité technico-économique relative à la construction des installations de transport (pipe line) et de stockage jusqu'au site de consommation.

En plus, si elle contient la matière organique, les minéraux carbonatés (calcite, dolomie) ou sulfurés (pyrite), la matière première argileuse peut être la seconde source d'émission de gaz carbonique.

A basse température, les matières organiques, présentes dans la terre argileuse et qui, dans un tesson à texture « lâche », brûleraient complètement grâce à la présence de l'oxygène, subissent une combustion incomplète avec dépôt de carbone.

Entre 800 et 1000°C environs, les réactions suivantes peuvent se produire :



Lors de la cuisson des argiles calcaires aux environs de 800°C, le carbonate de chaux CaCO_3 se décompose en chaux vive CaO (décarbonatation) avec dégagement de gaz carbonique CO_2 . Un gramme de calcite libère un volume de CO_2 correspondant, à froid, à plus de 0,200 litre. A 1000°C, la même quantité pondérale de CO_2 occupe un volume de un litre. Ce gaz formé exerce une poussée déformante sur le produit cuit provoquant ainsi des altérations structurales.

Les matières premières étudiées présentent un grand avantage à ce sujet car elles sont extrêmement pauvres en matières organiques et ne contiennent pas de pyrite, ni de la calcite.

VI.5.2.2. Atmosphère

La conception des équipements ou ouvrages liés aux opérations (déversement des matières pulvérulents, séchage, cuisson des pièces) susceptibles de générer des émissions de polluants atmosphériques (poussières, fluorures, chlorures, SO_x, dioxines,...) doit être faite en fonction de l'adéquation par rapport aux zones sensibles (zones d'habitats, zones de loisirs, zones protégées), aux critères de proximité et d'orientation par rapport aux vents dominants.

A ce jour, l'industrie vétuste de Congo-Briques (Ex-BRIKIN) qui se trouve en pleine zone d'habitation humaine à Binza à Kinshasa ne répond plus à ces critères ; sa rénovation et/ou sa délocalisation sont plus qu'indispensables.

Des analyses sur les matières premières, les combustibles, le taux de chlore des eaux utilisées pour la préparation des pâtes sont nécessaires et recommandées pour mieux comprendre les problèmes liés aux émissions atmosphériques dans l'industrie céramique. L'emploi de certaines techniques de nettoyage des fumées telles que la séparation centrifuge (cyclone), la filtration à l'aide de toiles (filtres à manches), l'aspiration sous eau (mise en contact des fumées avec un liquide de sorte que les poussières soient emprisonnées dans le liquide lequel est simplement épuré) comptent parmi les mesures de réduction des émissions atmosphériques.

VI.5.2.3. Eau

Le secteur des industries céramiques est susceptible d'influencer le débit naturel et les caractéristiques physico-chimiques d'un cours d'eau. Les eaux rejetées sont principalement de deux sortes :

- les eaux de lessivage des zones de stockage des matières premières ; elles contiennent une forte concentration en particules sédimentables et en suspension. Ces eaux seront rassemblées au niveau d'un bassin de décantation dont la surverse (de qualité à vérifier avant rejet) se déverse vers le milieu récepteur (collecteur ou cours d'eau) ;
- les eaux de filtration dans le cas des procédés de fabrication faisant intervenir des barbotines qui contiennent essentiellement des métaux lourds, des particules sédimentables et en suspension.

Une épuration comportant une étape de décantation, une étape de coagulation et de floculation est utile avant tout rejet des eaux de lessivage ou de filtration vers le milieu récepteur.

VI.5.2.4. Sol et sous-sol

Des pollutions locales des sols et sous-sols peuvent apparaître suite :

- au phénomène de lessivage par les eaux de pluies de zones de stockage des matières premières ;
- aux dépôts de déchets tels que les boues des installations d'épuration ou de nettoyage, surplus de production.

Au niveau de la qualité des sols, on tiendra compte du risque de contamination des sols en périphérie des usines par les émissions de polluants des cheminées. L'évaluation de la sensibilité des sols aux alentours des usines de fabrication de céramiques est nécessaire. Une utilisation des sols concernés par l'agriculture constitue un facteur de sensibilité accru.

Quant à la stabilité des sols, il convient d'établir des constructions en fonction des études des caractéristiques géomécaniques des sols concernés par le projet.

VI.5.2.5. Biotopes

Parmi les activités de l'industrie céramique qui peuvent induire des nuisances susceptibles d'altérer gravement les écosystèmes, on retiendra principalement :

- le creusement des carrières ou puits d'exploitation des matières premières ;
- la possibilité d'altération des milieux aquatiques en cas de rejets d'eaux contaminées (matières en suspension et métaux lourds) ;
- la possibilité d'altération des milieux terrestres (forestiers) par les rejets d'effluents (retombées acides, émissions des polluants,...) ; certaines espèces végétales y étant particulièrement sensibles ;
- le cas échéant, la destruction des milieux naturels de valeur présents au droit du site d'implantation du projet.

VI.5.2.6. Déchets

A l'exception des déchets provenant de la maintenance des installations (huiles usagées, graisses,...) et des déchets liés à la manutention des matières premières (emballage par exemple), le secteur des industries céramiques possède une grande potentialité pour le recyclage en interne de ses déchets de production.

En gros, on peut considérer que jusqu'à l'étape de séchage incluse, toutes les matières constitutives des pièces (pâtes) peuvent être intégralement recyclées dans le procédé de fabrication. Une fois cuites, les pièces non conformes peuvent être

broyées et mélangées dans la pâte pour constituer la structure de la pièce (cas très fréquent lors de la fabrication des réfractaires).

Toutefois, la récupération d'éventuels déchets provenant du nettoyage des dépoussiéreurs comme matières premières doit se faire avec prudence car ils peuvent contenir d'importantes concentrations en soufre ou en fluor.

VI.5.2.7. Santé et sécurité

Le secteur de la fabrication des produits céramiques génère beaucoup de poussières dont la toxicité est fonction de la taille et de la nature des particules considérées :

- les particules en suspension, de taille inférieure à 10µm, peuvent être inhalées par les personnes exposées à ce genre de danger ;
- les particules inférieures à 5 µm peuvent poser un problème de santé puisqu'elles sont « respirables », c'est-à-dire qu'elles peuvent atteindre les alvéoles pulmonaires et être à l'origine des maladies pulmonaires comme la pneumoconiose. La nature de la poussière joue un rôle dans la gravité de cette maladie : un indice de nocivité relative, compris entre 0 et 1, a été défini (quartz : 1 ; calcaire : 0 ; argile : 0,2 ; charbon : 0,1) ;
- les poussières sédimentables, ou retombées appartiennent aux particules de plus grande taille, supérieure à 10 µm, qui ne sont généralement pas directement nuisibles à la santé mais peuvent présenter une certaine écotoxicité et, le plus souvent, une nuisance locale. Elles provoquent une pollution caractérisée notamment par l'empoussièrement des biens matériels chez les riverains et des bâtiments, des végétaux, du paysage et du cadre de vie en général.

Il faut noter enfin que les plus gros risques d'explosion dans les secteurs de la céramique se situent essentiellement au niveau des fours.

Une exploitation des matériaux argileux de Kinshasa et environs qui tient compte des éléments ci-haut mentionnés va s'inscrire dans le schéma du développement durable d'équation (Fig.126) :

ECOLOGIE + ECONOMIE + SOCIAL = DEVELOPPEMENT DURABLE

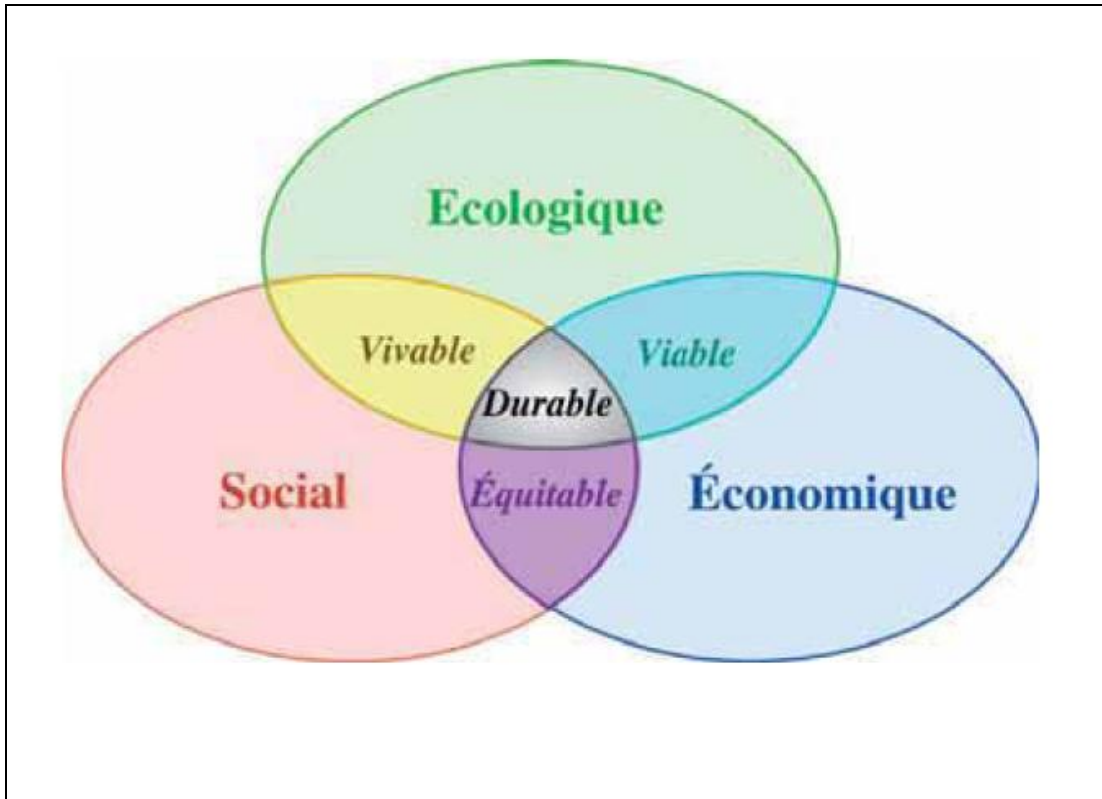


Fig. 126: Composantes du principe du développement durable (COULOMBEL J. et al., 2010)

VI.6. Conclusions partielles

Les matériaux argileux de la Province de Kinshasa et environs connaissent actuellement une exploitation artisanale par les riverains non identifiés et mal connus par le pouvoir public qui n'en tire pas grand profit.

En plus des avantages socio-économiques des artisans, l'exploitation de ces matières naturelles a contribué, tant soit peu, à l'amélioration de l'habitat des zones se trouvant dans le voisinage de sites d'exploitation.

La ville de Kinshasa, capitale de la RD Congo, et certaines villes ou cités de l'intérieur de la province du Bas-Congo (Luila, Lukunga Mputu, Mbanza Ngungu, Kinsatu, Matadi, ...) sont les principales zones de consommation des produits cuits de Kasangulu via la Nationale n°1 et le Chemin de fer.

Les argiles kaolinitiques de Kingabwa sont commercialisées sur place à Kinshasa et sur les marchés africains (Angola, Gabon et Congo Brazza).

Néanmoins, certaines composantes biophysiques de l'environnement sont négativement et grandement touchées par les activités de l'artisanat lié à ces exploitations.

En effet, l'exploitation en carrières artisanales des matériaux argileux, à l'intérieur des zones d'habitation, dans les berges des cours d'eau ou à côté des voies de communications (Nationale n°1 et chemin de fer), occasionne l'élimination du couvert végétal, les modifications brutales et artificielles du paysage par l'existence de plusieurs trous béants sujets à l'érosion, aux glissements de terrain, etc. Le degré de dangerosité de ces risques peut être plus important dans le cas de la cité de Kasangulu qui est constituée d'une succession des collines aux pentes moyennes et fortes.

Les puits d'exploitation artisanale bien que situés même à proximité de la Nationale n°1, du Chemin de fer, des avenues ou dans des parcelles d'habitation humaine ne sont pas remblayés à la fin des opérations. Ces puits sont à la base des nouveaux problèmes environnementaux car ils :

- finissent par devenir des points de décharges (poubelles naturelles) rendant l'environnement mal sain (foyers des moustiques);
- rendent les terrains instables pouvant provoquer des éboulements, la dégradation des routes et du chemin de fer ;
- occasionnent la perte d'esthétique de la cité.

Le creusement des puits et leur exploitation ne font recours à aucune règle sécuritaire en matière du génie civil et exposent les exploitants aux grands risques naturels y afférents.

Le recours à l'énergie de bois comme combustible exclusif pour la cuisson des briques a des effets ravageurs sur les sols surtout qu'on est en présence d'un terrain de forte pente à Kasangulu. Les exploitants eux-mêmes ont affirmé les inquiétudes de plusieurs couches de la population locale au sujet de la rareté actuelle ou de la progressive disparition, à Kasangulu, de certaines variétés des essences appréciées dont le manguier, le safoutier, l'acacia et l'avocatier.

Par ailleurs, testées au laboratoire, les briques artisanales cuites ou stabilisées de Kasangulu présentent une résistance mécanique à la compression inférieure à 2 N/mm². Cette valeur, trop faible et hors normes internationales en la matière, présente un risque pour les habitants surtout qu'on se trouve dans une zone tropicale où il y a des fortes précipitations (intempéries). Le crépissement des murs pendant la construction devient alors une solution palliative même si cela impose une valeur ajoutée (augmentation du coût de la construction).

Ainsi, pour que l'exploitation des matériaux argileux de la Province de Kinshasa et de la cité de Kasangulu s'intègre dans un processus de développement local durable, nous proposons :

- l'encadrement et l'éducation des exploitants artisanaux par le pouvoir public et la création d'un cadre de concertation pour l'exploitation et la gestion rationnelles de ces ressources minérales industrielles, substances naturelles non renouvelables. Ceci passe par le strict respect des obligations légales en vigueur (Code minier, titre IV : de l'exploitation artisanale des mines) par les exploitants artisanaux surtout que ces derniers ne détiennent, à ce jour, aucun titre minier y afférent. Le rôle du service spécialisé du Ministère des Mines qui s'occupe des mines à petite échelle (SAESSCAM) s'avère donc indispensable;
- l'interdiction de creuser des puits près des maisons d'habitation, des infrastructures de communication, des versants en pente forte et des berges des rivières ;
- l'incitation à la création des Petites et Moyennes Entreprises (PME) dans la filière de la céramique de construction (Site de Kasangulu) ou fine (Site de Kingabwa dans la vallée de la Ndjili) inexistante dans cette région.

Au regard des conditions climatiques et du prix de ciment dans la province de Kinshasa, l'usage des matériaux de construction de type terre cuite est avantageux par rapport aux matériaux de terre crue ou stabilisée.

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Dans une perspective de développement local durable, ce travail s'est assigné comme objectif de procéder à la caractérisation fine et technologique des matériaux argileux de la province de Kinshasa (site pilote de Kingabwa) et environ (site pilote de Kasangulu) en vue de leur valorisation dans le secteur de la céramique. Il présente donc un double intérêt, scientifique et industriel, et contribue à la mise en valeur, à la promotion des matériaux locaux et du développement du sol et/ou sous-sol des provinces concernées.

1. Connaissances scientifiques acquises

Développés sous le manteau d'altération de la roche gréseuse d'Inkisi, les matériaux argileux de Kasangulu sont plastiques (I_p : 16-27 ; $W_L < 50\%$; W_S : 14-21%), inorganiques (M.O $< 1\%$), très consistants (I_c : 1,2-1,4), limoneux (11 à 42% de limons), sableux (14 à 32% de sables fins et 24 à 35% de sables grossiers) et latéritisés.

La composition minéralogique de ces matériaux est dominée par la kaolinite, le quartz, la muscovite ou l'illite, la goethite et la chlorite. Du point de vue chimique, ces matériaux sont caractérisés par de teneurs en : silice: 62 à 71% ; alumine : 10 à 22% ; sesquioxyde de fer et oxyde de titane: 2 à 7% ; oxydes alcalins inférieures à 2% ; oxydes alcalino-terreux inférieures à 1% ; métaux lourds (Pb, Cu, Co, Zn) trop faibles (inférieures à 0,2%).

Les matériaux naturels extraits du site de Kingabwa correspondent aux argiles alluvionnaires, inorganiques (M.O $<1\%$), grasses, de consistance plastique (I_c : 0,52-0,89), très compressibles ou très plastiques (I_p : 36-50 ; W_S : 16-21% ; $W_L > 50\%$). Ils comprennent essentiellement deux fractions granulométriques : argiles (42 à 59%) et limons (41 à 54%). La quasi-totalité de ces matériaux sont constitués des particules de diamètre inférieur à 50 μm avec au moins 90% de particules de taille inférieure ou égale à 10 μm . Ces matériaux titrent : entre 50 et 59% de la silice; environ 30% d'alumine; entre 1 et 2% de sesquioxyde de fer et environ 1% d'oxyde de titane; autour de 1% d'oxydes alcalins et moins de 1% d'alcalino-terreux; moins de 0,2% de métaux lourds (Pb, Cu, Co, Zn). La kaolinite bien cristallisée et de grande pureté reste le minéral le plus abondant et lequel est accompagné du quartz et de l'illite.

La composition minéralogique de produits cuits est qualitativement semblable (quartz, mullite, spinelle, cristobalite, oxyde de fer et de titane) mais variable selon les températures de cuisson utilisées.

D'une résistance mécanique à la compression supérieure à 39 N/mm^2 et celle à la flexion comprise entre 5 et 6 N/mm^2 , les briquettes cuites à base de matériaux extraits du site de Kingabwa présentent une couleur blanche à blanc-crème à la cuisson.

Les produits cuits à partir des matériaux naturels de Kasangulu sont oranges ou rouges sans ajouts d'adjuvants et montrent des contraintes à la compression dont les valeurs maximales ($31,9\text{-}32,7\text{N/mm}^2$) sont situées à 1050°C et les plus faibles ($17\text{-}18\text{N/mm}^2$) à des températures de cuisson les plus importantes (1100 et 1150°C). Il a été montré que cette évolution de la résistance mécanique à la compression dans les briquettes cuites n'est pas totalement fonction de la porosité ou des retraits à la cuisson ni de la simple quantité de mullite formée. La fissuration de la pâte et le développement des fissures linéaires, surtout celles en cercles concentriques autour des cristaux influencent beaucoup cette propriété.

2. Secteurs de valorisation

Les connaissances scientifiques acquises sur les matériaux naturels et sur les produits fabriqués permettent de justifier l'emploi des matériaux du site pilote de Kasangulu dans la filière grossière de la céramique ou céramique de construction ; ceux du deuxième site pilote, Kingabwa, dans le secteur des réfractaires silico-alumineux et dans la branche de la céramique fine, traditionnelle et industrielle.

En effet, les matériaux de Kasangulu et plus particulièrement les lithofaciès des couches 2 (argile sableuse) et 3 (argile latéritisée) sont des produits silico-argileux plastiques qui constituent des ressources minérales industrielles de bonne qualité pour la fabrication des produits variés dont les briques stabilisées ou cuites (creuses, perforées, pleines et de parement), les hourdis et les tuiles.

La présence de la goethite associée à l'oxyde de titane dans ces produits naturels apporte une plus-value considérable dans la teinture rougeâtre et/ou jaunâtre des produits finis. Les teneurs en oxyde de fer couplées aux faibles teneurs en oxydes alcalins et alcalino-terreux conditionnent la fusibilité et donc l'aptitude à donner des produits suffisamment grésés pour présenter des caractéristiques utiles (porosité, perméabilité et résistance mécanique) satisfaisantes. Mais la présence de sables trop grossiers dans ces matériaux naturels peut entraîner des problèmes de perméabilité dans les tuiles. Des tuiles de bonne qualité doivent donc dériver de mélanges optimaux des produits naturels.

Afin d'obtenir des blocs de haute densité et de minimiser la quantité de stabilisant, il est souhaitable de procéder au mélange des matériaux des couches 2 (argile

sableuse) et 3(argile latéritisée) sur le même profil avec une teneur en eau optimale variant entre 14 et 16%.

Pour avoir des briques et même des tuiles de bonne qualité à partir de matériaux de Kasangulu, il est indispensable de les cuire à des températures de l'ordre de 1050°C en vue d'éviter de taux d'absorption d'eau supérieurs à 10% qui favorisent l'obtention des produits moins densifiant ($MVS < 2,2 \text{ Kg/m}^3$). Cette température de cuisson de 1050°C n'engendre que de faibles retraits dont la moyenne tourne autour de 1%.

Les argiles de Kingabwa sont utilisables dans la fabrication des produits à plus haute valeur ajoutée comme les porcelaines. Néanmoins, les produits cuits de Kingabwa ont présenté un retrait à la cuisson de 9 à 12% pour de températures allant de 1100 à 1150°C et une perte en poids à la cuisson de l'ordre de 14% en moyenne. Pour une bonne rentabilité industrielle, ces retraits peuvent être minimisés par l'ajout d'une quantité optimale de dégraissant ou en revoyant à la hausse la température du séchage pendant l'élaboration des produits.

Les ressources minérales étudiées présentent un avantage environnemental de taille pour leur emploi comme matières premières dans l'industrie céramique. En effet, ces substances sont très pauvres en matières organiques et ne contiennent pas des éléments tels que le soufre, la pyrite ou les carbonates.

3. Perspectives

3.1. Confection et caractérisation des briques réfractaires

Suite à la prolifération des unités de traitement de minerais en RD Congo, des besoins en briques réfractaires sont énormes. Comptées à des centaines au Katanga par exemple, toutes les usines de ce genre importent des réfractaires de l'extérieur du pays (Afrique du sud, Europe, ...). Des arrêts temporaires de production occasionnés par le manque de ces matériaux sont fréquents dans cette province minière.

Les études menées dans le cadre de cette recherche ont montré l'intérêt que présentent les argiles de Kingabwa dans la fabrication des briques réfractaires.

La confection et la caractérisation des briques cuites à des températures supérieures à 1200°C sont indispensables pour apporter des informations technologiques complémentaires utiles (essais thermiques et point de ramollissement par exemple) non acquises dans cette étude.

De plus, par cuisson de l'argile kaolinitique de Kingabwa, on pourrait générer le métakaolin qui est un matériau possédant un potentiel élevé d'activité pouzzolanique pour être utilisé comme addition minérale dans les liants hydrauliques. La recherche de matériaux de ce genre est de nos jours au cœur d'actualités dans l'industrie cimentière qui oriente ses développements technologiques vers des solutions qui permettent d'optimiser ses dépenses énergétiques. Le métakaolin est envisagé comme candidat potentiel pouvant être utilisé comme ajouts minéraux dont le coût de production est inférieur à celui de ciment, et qui par conséquent, pourra le remplacer partiellement. Les propriétés pouzzolaniques de métakaolin issu de la kaolinite de Kingabwa valent donc la peine d'être étudiées en profondeur.

Par ailleurs, tenant compte de la composition chimique et minéralogique assez simple de matériaux argileux de Kingabwa par rapport à celles d'autres argiles brutes exploitées en Europe et leurs teneurs négligeables en métaux lourds et/ou toxiques (Pb, Cu, Co, Zn, S), l'utilisation des argiles blanchâtres de Kingabwa ne saurait se limiter aux produits céramiques ou aux matériaux de construction. Des traitements judicieux apportés à ces matériaux permettraient d'envisager leur valorisation dans les domaines aussi variés que la charge minérale des matériaux composites (pâtes à papier, encres et peintures, plastiques), la fabrication des produits pharmaceutiques, sanitaires et cosmétiques.

Compte tenu des occupations humaines (constructions, cultures,...) dites anarchiques de plus en plus grandissantes le long de la vallée de la Ndjili, son potentiel en argiles kaolinitiques mérite d'être évalué quantitativement en vue de permettre au pouvoir public de prendre des bonnes décisions liées à l'exploitation semi-industrielle ou industrielle de ces argiles que nous qualifions de « nobles ».

3.2. Valorisation de déchets énergétiques et analyse du cycle de vie

Le secteur de la céramique compte parmi les industries gourmandes en énergie. Pour éviter l'usage de charbons de bois et des arbres dans la combustion des briques au sein de la future « Briqueterie-Tuilerie » de Kasangulu, il est indispensable de recourir aux autres ressources énergétiques disponibles dont les déchets végétaux (sciures), les pneus en caoutchouc, les sacs plastiques, et les cartons.

Dans une perspective d'un projet de faisabilité environnemento-technico-économique et social, ces substances peuvent être identifiées, quantifiées et caractérisées. Les études de laboratoire à mener concernent essentiellement la détermination du pouvoir calorifique et de teneurs en carbone organique

susceptible d'être produit lors du processus de combustion des briques. La valorisation de ces ressources dans une industrie briquetière à venir aura donc un impact environnemental considérable dans la province de Kinshasa. Cette dernière ne cesse de mobiliser, chaque année, des gros moyens financiers et humains pour la gestion de ses déchets de différentes catégories.

En outre, ce projet devrait s'atteler aussi à l'analyse du cycle de vie de tous les produits impliqués dans le processus de la fabrication céramique, les flux de matières et d'énergie. Par cette méthode, il est possible de quantifier les impacts environnementaux potentiels de ces produits depuis la phase d'extraction des matières premières argileuses en passant par les procédés de fabrication jusqu'à la commercialisation et l'utilisation des matériaux céramiques fabriqués. La conduite d'une telle évaluation peut également permettre de récupérer et valoriser les produits présentant les impacts les plus faibles. Outil normalisé et reconnu, l'analyse du cycle de vie est actuellement la méthode la plus aboutie en termes d'évaluation environnementale globale et multicritères.

3.3. Cartographie informatisée des substances minérales industrielles

Pour gérer de façon durable et intégrée des ressources minérales industrielles de la RD Congo et en particulier celles de la province de Kinshasa, il est souhaitable d'envisager l'organisation des données y afférentes sous forme cartographique à l'aide des outils du Système d'Information Géographique (S.I.G).

Dans cette perspective, les études de caractérisation et de valorisation des matériaux locaux de construction méritent d'être soutenues et font appel à l'innovation technologique. Elles devraient être donc sous charge du Ministère de la Recherche Scientifique au sein d'une de ses institutions existantes (Le Centre de Recherches Géologiques et Minières par exemple) ou d'une autre structure à créer. Un des exemples éloquent est celui du Cameroun qui a placé sous tutelle du Ministère de la Recherche Scientifique et de l'innovation, la mission de promotion des matériaux locaux (MIPROMALO).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Alcântara A.C.S., Beltrão M.S.S., Oliveira H.A., Gimenez I.F., Barreto L.S., 2008. Characterization of ceramic tiles prepared from two clays Sergipe-Brazil. *Applied Clay Science* 39, 160-165p.

Alexanian C., Morel P., Le Bouffant L., 1966. Sur les spectres d'absorption infrarouge des minéraux naturels. *Bull. Soc. Fr. Céram.*, 71, 3-38p.

Amigo J.M., Bastida J., Sanz A., Signes M., Serrano J., 1994. Crystallinity of Lower Cretaceous kaolinites Teruel (Spain). *Applied Clay Science*, 9, 51-69p.

Aquater, 1987. Etude hydrogéologique et recherche des eaux souterraines dans la partie Est de Kinshasa. Régie de Distribution d'Eau, Kinshasa, Rapport inédit.

Arib A., Sarhiri A., Moussa R., Remmal T., Gomina M., 2007. Caractéristiques structurales et mécaniques de céramiques à base d'argiles: influence de la source de feldspath. *ScienceDirect, C.R. Chimie*, 10, 502-510p.

Association Internationale Pour l'Etude des Argiles, 1996. Newsletter n°32.

Bailon J.P., Dorlot J.M., 2000. Des minéraux. 3^{ème} éd. Montréal: Presses Internationales Polytechniques, 1-736p.

Bakam A.B., Kordikontar M., Konfor Njilah I., 2004. Essais de stabilisation de la latérite avec les fibres cellulosiques. *African Journal of Science and Technology, Science and Engineering*, vol.5, n°1, 22-28p.

Baoping w., Adnan A., Nurdan S., 2002. A comparative study of particle size analyses by sieve-Hydrometer and Laser Diffraction Methods. *Geotechnical Testing Journal*, vol.25 n°4, 1-9p.

Barrios Neira J., Montealegre L., Lopez L.A., RomeroL., 2009. Ceramics of Ategua (Cordoba, Spain): Mineralogical and petrographic study. *Applied Clay Science* 42, 529-537p.

Bernache A., 1993. Chimie physique du frittage. Editions Hermès, Paris, 1-147p.

Bergaya F., Theng B.K.G., Lagaly G., 2006. Handbook of clay science. Development of clay. Science, vol.1, Amsterdam, 1224p.

Bloodworth A.J., Highley D.E., Mitchlell C.J., 1993. Industrial Minerals Laboratory Manuel: kaolin BGS. Technical Report WG/93/1, 1-76p.

Boutterin C., Davidovits J., 2003. Réticulation géopolymérique et matériau de construction. Geopolymer 88, Vol.1, Paris, 79-88p.

Brindley G.W., Chih-Chun K., Harrisson J.L., Lipsicas M., raythatha R., 1986. Relations between structural disorder and other characteristics of kaolinites and dickites. Clays and Clay Minerals, 34, 239-249p.

Brindley G.W., Nakahira M., 1959. The kaolinite-mullite reaction series: I, a survey of outstanding problems. Journal of the American Ceramic Society, vol. 42, 311-314p.

Brown G., Brindley G.W., 1980. X-ray diffraction procedures for clay mineral identification. In: Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. Mineralogical Soc. London, 305-359p.

Brown I.W.M., Mackenzie K.J.D., Bowden M.E., Meinhold R.H., 1985. Outstanding problems in the kaolinite-mullite reaction sequence investigated by ^{29}Si and ^{27}Al solid state Nuclear Resonance: II, high temperature transformations of metakaolin. Journal of the American Ceramic Society, vol. 68, 298-301p.

Caillère S., Henin S., Rautureau M., 1982. Minéralogie des argiles, II : classification et nomenclature. Masson, Paris, 1-189p.

Calabria J.A., Wander L.V., Boccaccini A.R., 2009. Microstructure and chemical degradation of adobe and clay bricks. Ceramics International, 35, 665-671p.

Callaud M.J., 2004. Cours de mécanique des sols. Tome I : Propriétés des sols. Groupe EIER-ETSHER, 1-137p.

Carretero I., 2002. Clay minerals and their beneficial effects upon human health. A review. Applied Clay Science 21, 155-163p.

Carrol D.L., Kemp T.H., Bastow T.J., Smith M.E., 2005. Solid-state NMR characterization of the thermal transformation of a Hungarian white illite. Solid State Nuclear Magnetic Resonance, 28, 31-43p.

Carty W.M., 1999. The collidal nature of kaolinite. The American Ceramic Society Bulletin, vol. 78, 72-76p.

Cases J.M., Lietard O., Yvon J., Delon J.F., 1982. Etude des propriétés cristallographiques, morphologiques et superficielles de la Kaolinite désordonnée. Bull. Minéral. 105, 439-457p.

Castelein O., 2000. Influence de la vitesse du traitement thermique sur le comportement d'un kaolin : application au frittage rapide. Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 1-219p.

CDI-Craterre, 1996. Blocs de terre comprimée. Equipements de production. Série Technologies, N°5, ISBN (2-906901-12-1), 1-153p.

Cerame-Unie, 2003 et 2004. Proposed Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the European Ceramic Industry.

Ceratec, 1987. Blocs en terre stabilisée. Technologie de production. 1-31p.

Ceratec, 1997. Comportement des matières premières au cours du séchage et à la cuisson. Les défauts de cuisson. Formation professionnelle continue, Centre Technique des Tuiles et Briques, Touquet, Ploegsteert.

Chakravorty A.K., Ghosh D.K., 1978. Reexamination of the kaolinite-to-mullite reaction series. Journal of the American Ceramic Society, vol. 61, 170-173p.

Chakravorty A.K., Ghosh D.K., 1991. Kaolinite-mullite reaction series: the development and significance of a binary aluminosilicate phase. Journal of the American Ceramic Society, vol. 74, 1401-1406p.

Chen C.Y., Lan G.S., Tuan W.H., 2000. Microstructural evolution of mullite during the sintering of kaolin powder compacts. Ceramics International 26 (7), 715-720p.

Chen C.Y., Lan G.S., Tuan W.H., 2000. Preparation of mullite by the reaction sintering of kaolinite and alumina. . Journal of the European Ceramic Society, vol.20, n°14-15, 2519-2525p.

Christidis G.E., 2011. Industrial clays. European Mineralogical Union, Notes in Mineralogy, vol.9, chapter 9, 341-414p.

Cook H.E., Johnson P.D., Matti J.C., Zemmels I., 1975. Methods of sample preparation and x-ray diffraction analysis in x-ray mineralogy laboratory, in : Kaneps, A.G. et al. (Eds.), Init. Rep. DSDP XXVIII. Printing Office, Washington, DC, 997-1007p.

Costet J., Sanglerat G., 1981. Cours pratiques de mécanique des sols. Tome 1 : Plasticité et calcul des tassements. Edition Dunod, Paris, 1-339p.

Coulombel J., Duquenoy M., Terrones O., 2010. Construire en terre crue. Europe et environnement. 1-74p.

Cramp A., Lee S.V., Hermiman J., Hiscott R.N., Manley P.L., Piper D.J.W., Deptuck M., Johnston S.K. and Black K.S., 1997. Data report: Interlaboratory comparison of sediment grain-sizing techniques : Data from amazon four upper levee complex sediments. Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results vol. 155, 217-228p (eds.Flood, R.D., Piper, D.J.W, Klaus, A., and Peterson, L.C.)

CRAterre, 1991. Blocs de terre comprimée. Eléments de base. Allemagne, Eschborn, GATE, 1-27p.

Craterre-EAG, 1995. Blocs de terre comprimée. Manuel de production. Allemagne, Eschborn, GATE, 1-104p.

DDC, BUCO Ouagadougou, 2005. Etude de marché sur la diffusion et l'utilisation des matériaux locaux dans la construction d'habitat au Burkina Faso. Rapport définitif, TAMS Consult, 1-67p.

De Boer G.B.J, De Weerd C., Thoenes D., Goossens H.W.J., 1987. Laser diffraction spectrometry: Fraunhofer versus Mie scattering. Particle charact. 4, 14-19p.

De Maximy R. et Van Caille X., 1974. Géomorphologie de Kinshasa, in Atlas de Kinshasa, plache 8, Institut Géographique National.

De Saint Moulin L., 2001. Evolution de la population urbaine de la RD Congo, in Actes du séminaire national de concertation sur le Plan d'action national pour l'habitat, PNUD/CNUEH-Habitat, Ministère des Travaux publics, Aménagement du territoire, Urbanisme et Habitat, 31-48p.

De Saint Moulin L., 2007. Croissance de Kinshasa et transformations du réseau urbain de la RD Congo depuis l'indépendance, in Villes d'Afrique (sous la direction de Jean-Luc Vellut), Paris, L'Harmattan, 41-65.

Djangang C.N., Elimbi A., Melo V.C., Lecomte G.L., Nkoumbou C., Soro J., Bonnet J.P., Blanchart P., Njopwouo D., 2008. Sintering of clay-chamote ceramic composites for refractory bricks. Ceramics International 34, 1207-1213p.

Delbart V., 2000. Evolution de l'emprise spatiale de la ville de Kinshasa. Mémoire de licence en sciences géographiques, Université Libre de Bruxelles, 1-105p.

Delon J.F., Lietard O., Cases J.M., Richard M., Sauret G., Maume J.P., 1982. Possibilités d'emploi des kaolins de Charente dans le coulage des papiers et carton. Bull. Minéral., 105.

Doudi M., Marsigli M., Venturi I., 1999. Microstructure and mechanical properties of clays bricks : comparison between fast firing and traditional firing. Br. Ceram. Trans. 98 (1), 12-18p.

Dunham A.C. et Scott P.W., 1994. Appropriate technics for the evaluation of industrial mineral in developing countries. In: Industrial minerals in developing countries. AGID Report series. Geoscience in International Development, n°18, 31-38p.

Duval O., Gaillard H., Le Bissonnais Y., 2001. Utilisation de la granulométrie à diffraction laser pour la caractérisation des matériaux-sols et des sédiments. In: Livre des résumés-Publications ASF, 8ème Congrès Français de Sédimentologie, Paris, 36, 117-118p.

Egoroff A., 1955. Carte géologique de Léopoldville. Service Géologique du Congo Belge et du Rwanda-Urundi, 1-15p.

El Yakoubi N., M'hamedA., Mohamed O., 2006. Potentialité d'utilisation d'argiles marocaines de Jbel Kharron dans l'industrie céramique. C.R. Géosciences 338, ScienceDirect, 693-702p.

Elfil H., Srasra E., Dogguy M., 1995. Caractérisation physico-chimique de certaines argiles utilisées dans l'industrie céramique. Journal of Thermal Analysis, vol. 44, 663-683p.

Elimbi A., 2004. Etude du comportement thermique et des produits de cuisson (1000-1450°C) des argiles kaolinitiques de Bomkoul (Cameroun). Effets de l'incorporation des adjuvants minéraux locaux. Thèse doct. d'Etat, Univ. Yaoundé I, 1-189p.

Elton N.J., Gate L.F., Hooper J.J., 1999. Texture and orientation of kaolin in coatings. Clay Minerals, 34, 89-98p.

- Eno Belinga S.M., Ossah N.H., 1993.** Introduction à l'étude des argiles industrielles du Cameroun. Ann. Fac. Sci. Univer. Yaoundé n°15-16, 11-16p.
- Ezbakhe H., Bousad S., El Bakkour A., Ajzoul T., El Bouardi A., 2001.** Etude thermique de la terre stabilisée au ciment utilisée en construction au nord du Maroc. Rev. Energ. Rem. : Journées de Thermique, 69-72p.
- Fagel N., 2004.** Géologie des argiles. Notes de cours, Faculté des Sciences, Université de Liège, 1-185p.
- Fagel N., Boski T., Likhoshway L., Oberhaensli H., 2003.** Late Quaternary clay mineral record in Central Lake Baikal (Academician Ridge, Siberia). Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology 193, 159-179p.
- Ferd. Lietti S.A., 2004.** Guide de la céramique. Normes et caractéristiques techniques. Sion et Monthey, Suisse, 1-11p.
- Ferreol V., 2002.** La granulométrie laser. Ecole des Mines de Paris. Disponible dans <http://www.ensmp.fr/Fr/CENRG/SCPI-TEP/DocsPersonnel/DocMateriel/Granulo.htm>.
- Fialips G.C., 1999.** Etude expérimentale de la cristallinité et des conditions de formation de la kaolinite. Thèse Doct. Univers. Poitiers, France, 1-254p.
- Frenkel J., 1945.** Viscous flow of crystalline bodies under the action of surface tension. Journal of Physics (USSR), vol.9, 385-391p.
- Galtier L., Lécrivain L., Rocher P., Vouillemet M., 1992.** Approvisionnement de la France en minéraux industriels. Paris : Ministère de l'Industrie, des Postes et Télécommunication et du Commerce Extérieur, Convention N° 92.2.83.0001, 1-163p.
- Garcia Sanchez A., Alvarez Ayuso E., Jimenez B., 1999.** Sorption of heavy metals from industrial waste water by low-cost mineral silicates. Clay Minerals, 34, 469-477p.
- Gonzalez I., Galan E., Miras A., Aprico P., 1998.** New uses brick-making clay materials from the Bailén area (southern Spain). Clay Minerals, 33, 453-465p.
- Guerraoui F., zamama M., Ibnoussina M., 2008.** Caractérisations minéralogique et géotechnique des argiles utilisées dans la céramique de SAFI (Maroc). African

Journal of Science and Technology (AJST), Science and Engineering series, Vol. 9, N°1, 1-11p.

Guggenheim S., Adams J.M., Bain D.C., Bergaya F., Brigatti M.F., Drits V.A., Formoso M.L.L., Galan E., Kogure T., Stanjek H., 2006. Summary of recommendations of nomenclature committees relevant to clay mineralogy: report of the Association Internationale pour l'Etude des Argiles (AIPEA) nomenclature committee for 2006, Clay Miner. 41 863-877p.

Gut P., Ackerknecht D., 1993. Climat responsive building, appropriate building construction in tropical and subtropical regions. SKAT Publications, St. Gallen, Suisse, ISBN 3-908001-39-0, www.skat.ch.

Hajjaji M., Kacim S., Boulmane M., 2002. Mineralogy and firing characteristics of a clay from the valley of Ourika (Morocco). Applied Clay Science 21 (3/4), 203-212p.

Harben W.P., 1999. The Industrial Mineral Handbook. A guide to Markets, specification and prices. 3rd ed., International minerals information Ltd, 106-112p.

Hardy R., Tucker M., 1988. X-Ray powder diffraction of sediments. In: Techniques in sedimentology (ed. M. Tucker), Blackwell, Oxford, 394p.

Hart J.R., Zhu Y., Pirard E., 2011. Particle Size and Shape Characterisation: Current Technology and Practice. European Mineralogical Union, Notes in Mineralogy vol.9, chapter 4, 77-127p.

Hartwig E.F., Tack L., Miguel S.B., Allen P.N., Ariel B., 2006. Provenance and chemostratigraphy of the Neoproterozoic West Congolian Group in the Democratic Republic of Congo. Journal of African Earth Sciences 46, 221-239p.

Harvey C.C., Murray H.H., 1997. Industrial clays in the 21st century: A perspective of exploration, technology and utilization. Applied Clay Science 11, 285-310p.

Hetier J.M., Yoshinaga N., Weber F., 1977. Formation of clay minerals in andosols under temperate climate. Clay Minerals, 12, 299-307p.

Highley D.E., 1994. The role of industrial minerals in the economies of developing countries. In: Industrial minerals in developing countries. AGID Report series. Geoscience in International Development, n°18, 1-12p.

Hinckley D.N., 1962. Variability in crystallinity values among the kaolin deposits of the coastal plain of Georgia and south Carolina, Proc. 11th Nat. Conf. on clays and clay miner, Ottawa, 229-235p.

Holtz R.D., Kovacs W.D., 1991. Introduction à la géotechnique. Edition de l'école polytechnique de Montréal, Québec, 808p.

Holtzapffel T., 1985. Les minéraux argileux, préparation, analyse diffractométrique et détermination. Soc. Géol. Nord, n°12, 135p.

Hope E.W., Kittrick J.A., 1994. Surface tension and the morphology of halloysite. The American Mineralogist, 49, 859-866p.

Hôtel de ville de Kinshasa (RD Congo), 2007. De Nshasa à Kinshasa : un peu d'histoire. In Hôtel de ville de Kinshasa, Programme du gouvernement provincial (2007-2011), 15-18p.

Houben H., Guillaud H., 1989. Traité de construction en terre. Editions Parenthèses, vol. 1, Paris, 1-355p.

Ibnoussina M., Zamama M., Sekkat Z., Ayeb M., Frohlich F., Witam O., 2004. Comportements géotechniques des argiles: Cas des argiles brunes de Lalla Fatna (Safi, Maroc). Ann. Soc. Géol. Du Nord. TII, 2^{ème} Série, 15-20p.

InfoMil, 2003. Dutch fact sheets for the production of ceramics.

Jouenne C.A., 1984. Traité des Céramiques et Matériaux. Ed. Septima, Paris, 1-657p.

Jourdain A., 1966. La technologie des produits céramiques réfractaires. Ed Gauthier-Villard, Paris, 1-590p.

Joussein E., Petit S., Decarreau A., 2001. Une nouvelle méthode de dosage des minéraux argileux par spectroscopie infrarouge. Earth and Planetary Sciences 332, 83-89p.

Kabre S.T., Traore K., Blanchart P., 1998. Mineralogy of clay raw material from Burkina Faso and Niger used for ceramic wares. Applied Clay Science, 12, 310-317p.

- Kamseu E., Leonelli C., Boccaccini D.N., Miselli P., Pellacani M.G.U.C., 2007.** Characterization of porcelain compositions using two China clays from Cameroon. *Ceramics International* 33, 851-857p.
- Kanene M., 2001.** Evaluation des besoins prioritaires et des besoins à moyen et long terme en logements et en équipements urbains. In Actes du séminaire national de concertation sur le Plan d'action national pour l'habitat, PNUD/CNUEH-Habitat, Ministère des Travaux publics, Aménagement du territoire, Urbanisme et Habitat, 389p.
- Karfa T., Kabre T.S., Blanchart P., 2001.** Sintering of clay from Burkina Faso by dilatometry influence of the applied load and the pre-sintering heating rate. *Ceramics International* 27 (8), 875-882p.
- Kenneth P., Simon J.B., 2004.** Particle size analysis of sediments soils and related particulate material for forensic purposes using laser granulometry. ScienceDirect, *Forensic Science International*, 144, 19-27p.
- Klug F.G., Prochazka S., Doremus R.H., 1987.** Al_2O_3 - SiO_2 system in the mullite region. *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 70, 750-759p.
- Klug F.G., Prochazka S., Doremus R.H., 1990.** Al_2O_3 - SiO_2 phase diagram in the mullite region, *Ceram. Tr.*, 6; Mullite and mullite matrix composites/ed. Par R.F. DAVIS, J. PASK et SOMIYA, American Ceramic Society, OH, 15-43p.
- Kodama H., 1985.** Infrared spectra of minerals. Reference guide to identification and characterization of minerals for the study of soils. Chemistry and Biology Research Institute, Ottawa, Ontario, 1-197p.
- Konta J., 1979.** Deposits of ceramics raw materials. *Ceramic Monographs-Handbook of Ceramics*, Handbook of Ceramics, Monograph, 1.1.3, Freiburg: Verlag SchmidGmbH, Interceram, vol. 28, n°1, 1-6p.
- Kornman M., 2005.** Matériaux de construction en terre cuite. Septima, Paris, 1-275p.
- Lajoie J., Chagnon A., 1973.** Origin of red beds in a Cambrien flysch sequence, Canadian Appalachians, Quebec. *Sedimentology*, 20, 91-103p.

Lecomte G., 2004. Transformations thermiques, organisation structurale et frittage des composés Kaolinite-Muscovite. Thèse de doctorat, Université de Limoges, France, 1-198p.

Lecomte G., Pateyron B., Blanchart P., 2004. Experimental study and simulation of a vertical section mullite-ternary eutectic (985°) in the $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$ system. Mater. Res. Bull. 39 (10), 1469-1478p.

Lee S., Kim Y.J., Moon H.S., 1999. Phase transformation sequence from kaolinite to mullite investigated by an energy-filtering transmission electron microscope. Journal of the American Ceramic Society, vol. 82, 2841-2848p.

Lee W.E., Iqbal Y., 2001. Influence of mixing on mullite formation in porcelain. Journal of the European Ceramic Society, vol.21, 2583-2586p.

Lelo Nzuzi F., 2008. Kinshasa : Ville et Environnement. L'Harmattan, 75005 Paris, 282p.

Lemaire J., Léonard A.J., Delmon B., 1982. Mechanism of the thermal transformations of metakaolinite. Bulletin de Minéralogie, vol. 105, 501-507p.

Leonard A.J., 1976. Structural analysis of the transition phases in kaolinite-mullite thermal sequence. Journal of the American Ceramic Society, vol. 60, 37-43p.

Lietard O., 1977. Contribution à l'étude des propriétés physicochimiques, cristallographiques et morphologiques des kaolins. Thèse, Université de Nancy, 1-345p.

Ligas P., Vras I., Dondi M., Marsigli M., 1997. Kaolinitics materials from Romana (north-west Sardinia, Italy) and their ceramic properties. Applied Clay Science 12, 145-163p.

Liuc K.C., Thomas G., Caballero A., Moya J.S., Aza S., 1991. Microstructure and microanalysis of mullite processed by reaction sintering of kaolin-alumina mixtures. Ceramics Today-Tomorrow's Ceramics, Materials Science Monographs 66A, 177-186p.

Liuc K.C., Thomas G., Caballero A., Moya J.S., Aza S., 1994. Mullite formation in kaolinite-alpha-alumina. Acta Metallurgica et Metaterialia, vol. 42, 489-495p.

Luboya Kabanyishi E., 2007. Contribution à la gestion des ressources naturelles minérales non renouvelables : cas des argiles plastiques du quartier Yaounde à Kingabwa-Uzam dans la commune de Limite. Mémoire de DEA, Faculté des Sciences, Université de Kinshasa, 125p.

Maglione G., Carn M., 1975. Spectres infrarouges des minéraux salins et des silicates néoformés dans le bassin Tchadien. Cah. ORSTOM, sér. Géol., vol.VII, n°1, 3-9p.

Mamba Mpelle, 1997. Essais de formulation pour la fabrication des carreaux céramiques à partir d'une argile de Yaoundé. Journ. Cam. Buld Mat. Vol. 1, n°1, 16-20p.

Martin F., 1994. Etude cristallographique et cristalochimique de l'incorporation du germanium et du gallium dans les phyllosilicates. Approche par synthèse minérale. Thèse Doct. Université Aix-Marseille, France, 1-210p.

Martin F., 2005. Le talc fait la résistance. Journ. CNRS, 181, 1-11p.

Mazumdar S., Mukherjee B., 1983. Structural characterization of the spinel phase in the kaolinite-mullite reaction series through lattice energy. Journal of the American Ceramic Society, vol. 66, 610-612p.

Merabet D., Belkacemi H., 2003. Caractérisation minéralogique et chimique du kaolin de Tamazert (Algérie). Ann. Chim.Sci. Mat. 28, 61-83p.

Meyer A., Fisher A., 1997. Grain-size analysis of sediments from the northern Barbados accretionary prism. In: Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific results (eds.shipley, T.H., Ogava, Y. Blum et Bahr, J.M.), College station, Tx, 156, 337-341p.

Millot G., 1964. Géologie des argiles. Altération, sédimentologie, Géochimie. Moscou et Cie, 1-491p.

Minera Sabater, 2003. Fiche technique, Centre de traitement et laboratoire. Teruel, Espagne, 1-6p.

Ministère des Travaux Publics, Aménagement du territoire, Urbanisme et Habitat (Min. T.P.A.H.) de la RD Congo, 1999. Plan d'action national pour l'habitat. Vol. 2, diagnostic, 1-162p.

Ministère des Travaux Publics, Aménagement du territoire, Urbanisme et Habitat (RD Congo) et PNUD, 2000. Enquête nationale sur l'habitat et le profil socio-économique des ménages en milieu urbain. Rapport final, Kinshasa, 1-152p.

Ministère du Plan (RD Congo), 2004. Monographie de la ville de Kinshasa. Document inédit, 173p.

Minheiro E.A.C., Freire M.N., Silva A.G.P., Holanda J.N.F., 2005. Densification behaviour of red firing Brazilian kaolinitic clay. *Ceramics International* 31, 757-763p.

Mitchell D., Vincent A., 1997. Exploration and appraisal of plastic sedimentary clays for the fine ceramics industry. *Applied Clay Science*, 11 (2), 311-327p.

Monteiro S.N., Vieira C.M.F., 2004. Influence of firing temperature on the ceramic properties of clays from compos dos Goytacazes, Brazil. *Applied Clay Science* 27, 229-234p.

Moore D.M., Reynolds R.C., 1989. X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. Oxford University Press, Oxford, 332p.

Murray H.H., 2000. Traditional and new applications for kaolin, smectite and palygorskite: general overview. *Applied Clay Science* 17, 207-221p.

Murray H.H., Bundy W., Harvey C.C., 1993. Kaolin genesis and utilization. Eds, Special publication n°1, The Clay Minerals Society, 288p.

Murray H.H., Keller W.D., 1993. Kaolins, kaolins and kaolins. In: Kaolin Genesis and utilization, by H.H. Murray, W. Bundy and C. Harvey eds. Special publication n°1, The Clay Minerals Society.

Murray H.H., Partridge P., Post L.J., 1978. Alteration of a granite to kaolin: Mineralogy and geochemistry. *Schriften. Geol. Wiss., Berlin* 11, S. 197-208p.

Ndembo Longo J., 2009. Apport des outils hydrogéochimiques et isotopiques à la gestion de l'aquifère du Mont Amba (Kinshasa, RD Congo). Thèse de Doctorat, Université d'Avignon, France, 203p.

Ngon Ngon G., 2007. Caractérisation et évaluation des argiles latéritiques et alluviales de la région tropicale humide comme matériaux de construction : Cas des argiles de Yaoundé. Thèse Doct. Univers Yaoundé I, 1-240p.

Njopwouo D., 1988. Minéralogie de la fraction fine des matériaux argileux de Misséllélé et de Mussaka (Cameroun) utilisables dans le renforcement du caoutchouc naturel. Ann. Fac. Sci. Chim., 1(2).

Njopwouo D., Elimba A., Wandji R., 1994. Essais d'amélioration des caractéristiques thermodynamiques du produit de cuisson de l'argile kaolinique grise de Bamkoul (Cameroun). Ann. Fac. Sci.H-S, N°3, Chim. et Sci. Nat. 63-72p.

Njoya A., 2007. Etude du gisement de kaolin de Mayouom (Ouest Cameroun): Cartographie, minéralogie et géochimie. Thèse Doctorat, Université de Yaoundé I, Cameroun, 147p.

Nkoumbou C., Nyoya A., Njopwouo D., Wandji R., 2001. Intérêt économique des matériaux argileux. Actes de la 1^{ère} Conférence sur la valorisation des matériaux argileux du Cameroun, 1-12p.

Nyakairu G.W.A., Kurzweil H., Koeberl C., 2002. Mineralogical, geochemical, and sedimentological characteristics of clay deposits from central Uganda and their applications. Journal of African Earth Sciences, 35, 123-134p.

Occhio, 2011. User guide. 1-41p.

Okada K., Otsuka N., Osaka J., 1986. Characterisation of spinel phase formed in the kaolinite-mullite thermal sequence. Journal of the American Ceramic Society, vol. 69, 251-253p.

Olivier J.F., 1988. Argilothérapie. Les argiles et leurs compléments naturels. Edition Encre/Arys, Paris, 1-194p.

Pask J.A., Tomsia A.P., 1991. Formation of mullite from sol-gel mixture and kaolinite. Journal of the American Ceramic Society, vol. 74, 2367-2373p.

Percival H.J., Duncan J.F., Foster P.K., 1974. Interpretation of the kaolinite reaction sequence from infrared absorption spectra. Journal of the American Ceramic Society, vol. 57, 57-61p.

Petit S., 1994. Hétérogénéité et variabilité de la composition chimique des minéraux argileux : à quelle échelle ? Discussions de la notion de solution solide. HDR, Univ. Poitiers, France.

Petit S., Madejova J., Decarreau A., Martin F., 1999. Characterization of octahedral substitutions in kaolinites using near infrared spectroscopy. *Clays and Clay Minerals* 47, 103-108p.

Pilipchatin L.D., 2000. Sintering of fine clay kaolin mixtures with refractory clay. *Glass ceram.* 57 (5/6), 212-214p.

Pialy P., 2009. Etude de quelques matériaux argileux du site de Lembo (Cameroun) : minéralogie, comportement au frittage et analyse des propriétés d'élasticité. Thèse doct. Univ. Limoges, 1-130p.

Pirard E., Michel F., Grégoire M.P., 2007. Size distribution of powders in the range 1 μ m – 100 μ m: a comparison of static digital image analysis and laser diffraction. *PARTEC Congress Proceedings Nürnberg*, 1-4p.

Pirard E., Vergara N., Chapeau V., 2004. Direct estimation of sieve size distributions from 2-D image analysis of sand particles. *Proceeding of, International Congress for Particle Technology Nürnberg (Germany)*.

Prado M.O., Zanotto E.D., 2002. Glass sintering with concurrent crystallization. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Chimie*, vol.5, 773-786p.

Quantin P., 1972. Les andosols, revue bibliographique des connaissances actuelles. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, X(3), 273-301p.

Rautureau M., Caillère S., Hénin S., 2004. Les argiles. Editions Septima, 1-97p.

Rawle A., 2001. Basic principles of particle size analysis. Malvern Technical paper, 8p. Disponible sur: www.malvern.co.uk.

RD Congo, 2002. Code Minier. Loi N° 007/2002 du 11 juillet 2002. *Journal Officiel de la RD Congo*, Kinshasa, 1-137p.

RD Congo, 2003. Règlement Minier et ses Annexes. Décret N° 038/2003 du 26 Mars 2003. *Journal Officiel de la RD Congo*, Kinshasa, 1-212p.

Regideso, 2001. Rapport de Fin des Travaux de Forage. Projet A HI 2. REGIDESO-OXFAM-QUEBEC, Kinshasa, inédit.

Romero M, Martin-Marquez J., Rincon J.M., 2006. Kinetic of mullite formation from a porcelain stoneware body for tiles production. *Journal of the European Ceramic Society*, vol.26, 1647-1652p.

Sanchez E., Ibanez M.J., Gracia-tena J., Quereda M.F., Hutchings I.M., 2006. Porcelain tile microstructure: Implications for polished tile properties. *J. Eur. Ceram. Soc.* 26, 2533-2540p.

Sanz J., Madani A., Serratosa J.M., Moya J.S., Aza S., 1988. Aluminium 27 and silicon 29 magic angle spinning nuclear magnetic resonance study of the kaolinite-mullite transformation. *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 71, 418-421p.

Sarhiri A., 2003. Pâtes blanches pour carreaux céramiques, formulations, caractéristiques physico-chimiques et validation. Thèse, Université Hassan II, Casablanca, Maroc, 1-167p.

Scherer G.W., Bachman D.L., 1977. Sintering of low-density glasses: II, Experimental study. *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 60, n°5-6, 239-243p.

Service Géologique (RD Congo), 1964. Notice explicative de la feuille Léopoldville 1/200.000, S.5/15.

Sieffermann G., Jehl G., Millot G., 1968. Allophanes et minéraux argileux des altérations récentes des basaltes du Mont Cameroun. *Bull. Groupe Français des Argiles*, t.xx, 109-129p.

Sonuparlak B., Sarikaya M., Askay I., 1987. Spinel phase formation during the 980°C exothermic reaction in the kaolinite-to-mullite reaction series. *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 70, 837-842p.

Srikrishna K., Thomas G., Martinez R., Corral M.P., Aza S., Moya J.S., 1990. Kaolinite-mullite reaction series: a TEM study. *Journal of Materials Science*, vol.25, 607-612p.

Stein R., 1985. Rapid grain-size analyses of clay and silt fraction by sedigraph 5000D: comparairon with coulter counter and Atterberg methods. *Journal of sedimentary Petrology*, 55 (4), 590-615p.

Tack L., Wingate M.T.D., Liégeois J.P., Fernandez-Alonso M., Deblond A., 2001. Early Neoproterozoic magmatism (1000-910Ma) of the zanidian and Mayumbian

Groups (Bas-Congo): Onset of Rodinia rifting at the western edge of the Congo craton. *Precambrian research* 110, 277-306p.

Temuujin J., Mackenzie K.J.D., Schmucker M., Schneider H., Mcmanus J., Wimperis S., 2000. Phase evolution in mechanically treated mixtures of kaolinite and alumina hydrates (gibbsite and boehmite). *Journal of the European Ceramic Society*, vol.20, 413-421p.

Territoire de Kasangulu, 2006. Rapport annuel du territoire.

Theunynck S., 1994. Economie de l'habitat et de la construction au Sahel. Editions L'Harmattan, collection villes et entreprises, vol. 1 et 2, Paris. Disponible www.editions-harmattan.fr.

Thorez J., 1976. Practical Identification of Clay Minerals. Ed. G. Lelotte, Dison, 1-90p.

Thorez J., 1985. Argillogenesis and the hydrolysis index. *Miner. Petrogr. Acta* 29, 313-338p.

Thorez J., 1998. Différenciation minéralogique et génétique par DRX des smectites post-saturées au Li et K. In : Réunion spécialisée ASF-SGF, Lille, Vol.30. Publ. ASF, Paris, 106-107p.

Toussain F., Fripiat J.J., Gastuche M.C., 1963. Deshydroxylation of kaolinite. I.Kinetics. *Journal of Physical Chemistry*, vol. 67, 26-30p.

Traoré K., Blanchart P., Jernot J.P., Gomina M., 2007. Caractérisation physico-chimique et mécanique de matériaux céramiques obtenus à partir d'une argile kaolinitique du Burkina Faso. *ScienceDirect, C.R., Chimie*, 511-517p.

Tshika M., Mukadi L., Mukendi M., 1989. Etude chimique et minéralogique des argiles de la vallée de Ndjili/Kisenso. *Bulletin du Centre de Recherches Géologiques et Minières*, vol.I (1-2) 79-85p.

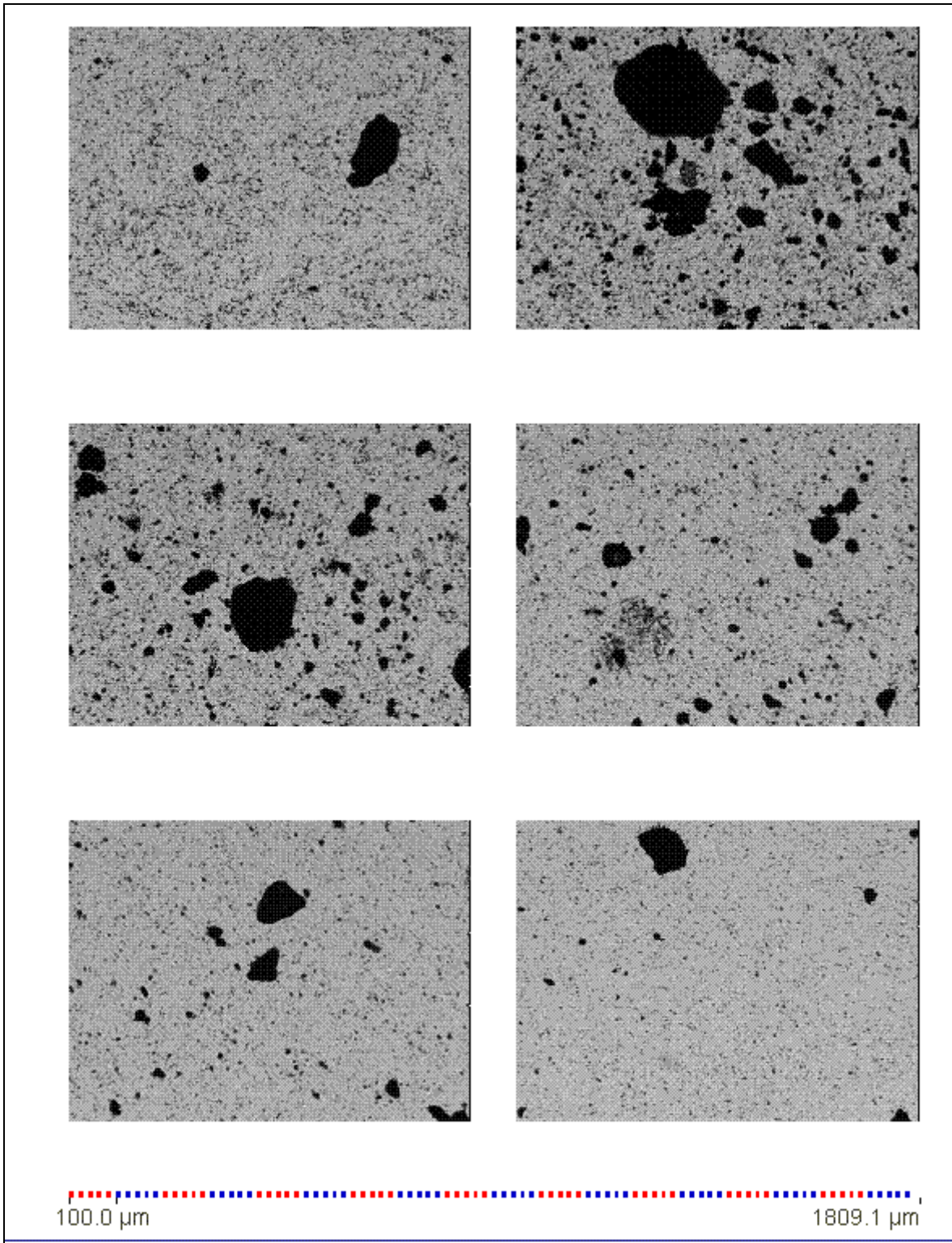
TWG Ceramics, 2006. Final TWG meeting Ceramics.

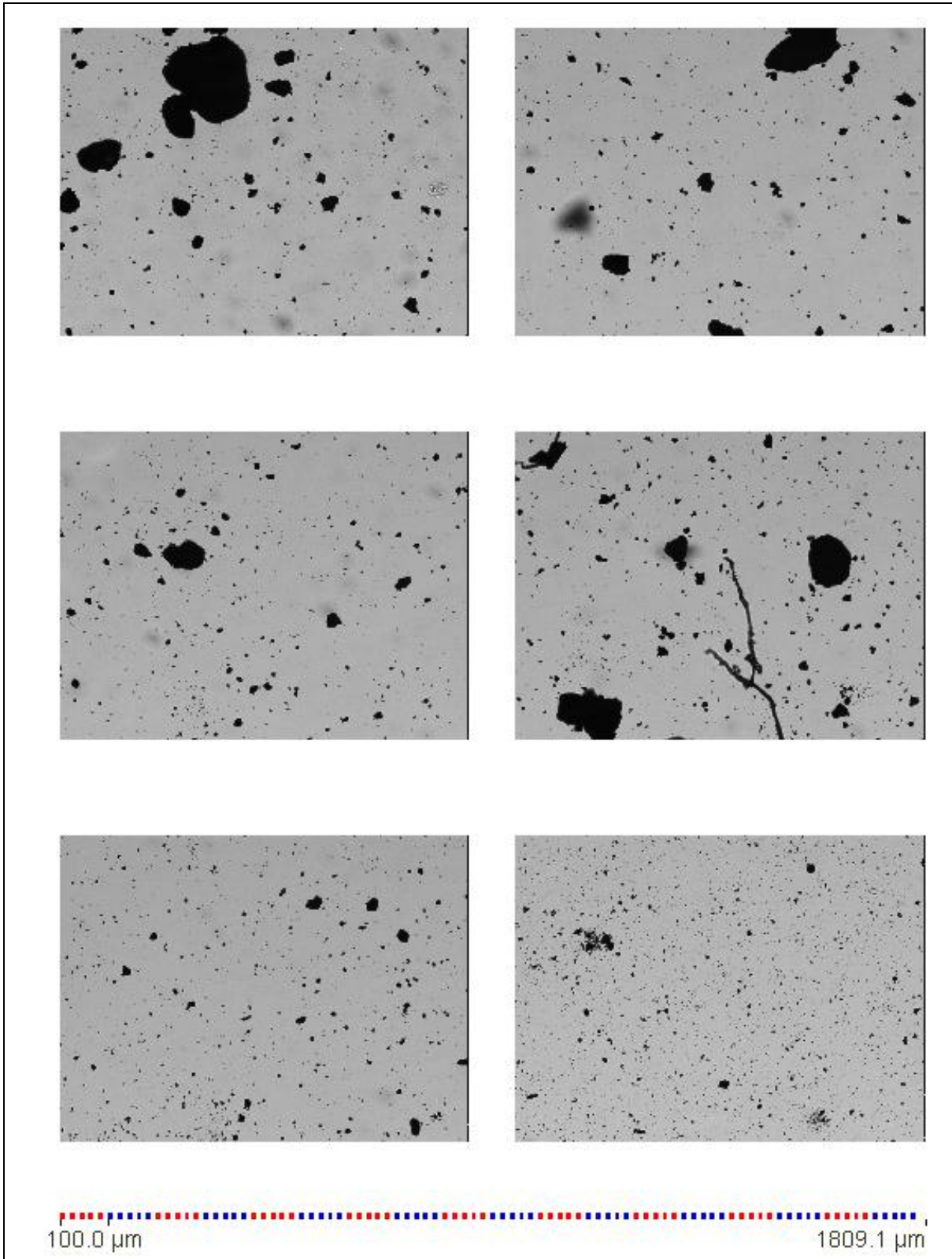
UBA, 2001. Exemplary investigation into the state of practical realisation of integrated environmental protection within the ceramics industry under observance of the IPPC-Directive and the development of BAT reference documents.

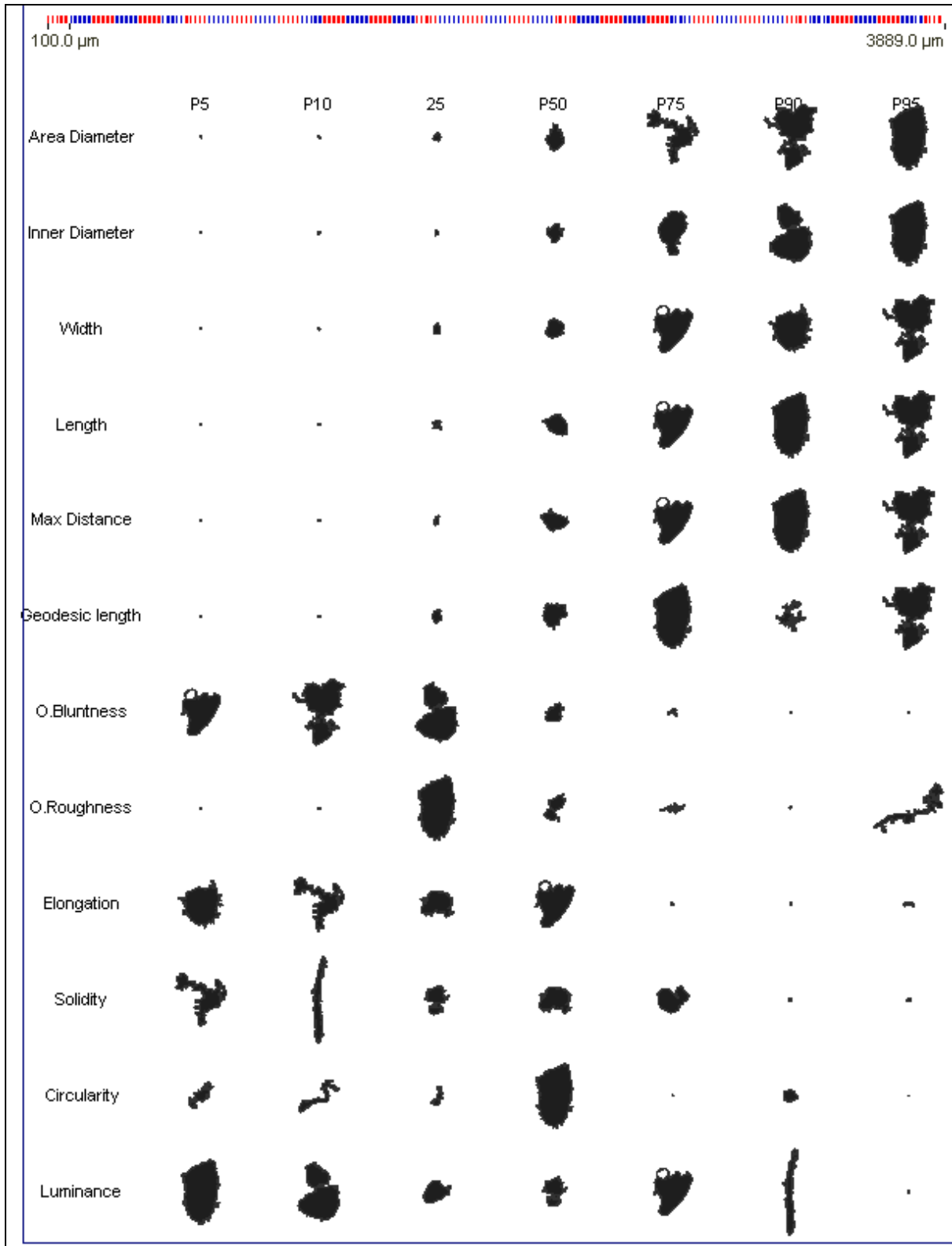
- Van Caillie X., 1987.** Notice explicative de la carte géologique et géotechnique de Kinshasa au 1/20.000. BEAU, Département des Travaux Publics et Aménagement du Territoire, Kinshasa, 1-21p.
- Voland T., Leuenberger C., Roque R., 2004.** Statistic correlations between two methods of pollutant emission evaluation, L'Industrie Céramique et Verrière. N°994, 54-66p.
- Wieckowski T., Wiewova A., 1976.** New approach to the problem of interlayer bonding in kaolinite. Clays and Clay Mineralogy, 24, 219-223p.
- Winkler H.G.F., 1954.** Bedeutung der Korngrößenverteilung und des Mineralbestandes von Tonen für die Herstellung grobkeramischer Erzeugnisse. Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft 31 (0), 337-343p.
- Wyss U., 2004.** Rapport d'enquête "Habitat à Ouagadougou", DDC, BUCO Ouagadougou, 1-74p.
- Yvon J., Garin P., Delon J.F., Cases J.M., 1982.** Valorisation des argiles kaolinitiques de Charente dans le caoutchouc naturel. Bull. Minéral., 105.
- Zamma M., 1984.** Contribution à l'étude structurale de la dickite et de la kaolinite par spectrométrie d'absorption infrarouge. Thèse de doctorat de l'université de Nancy, France.

ANNEXES

An. n°1: Images acquises sur les matériaux de Kasangulu (Faciès KaN_1C-2)



An. n°2: Images acquises sur les matériaux de Kingabwa (Faciès KiS_3C-4)

An. n°3 : Formes des particules des matériaux de Kasangulu (Faciès KaN_1C-2)

An. n°4: Formes des particules des matériaux de Kingabwa (Faciès KiS_3C-4)